



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“MANUFACTURA Y PRUEBAS DE UN PROTOTIPO DE
EXOESQUELETO PARA LA REHABILITACIÓN FÍSICA DE
MIEMBROS INFERIORES PARA EL GRUPO DE
INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE BIOINGENIERÍA DE LA
FACULTAD DE MECÁNICA ESPOCH”**

LLIGUAY CALDERON JOEL ENRIQUE

TRABAJO DE TITULACIÓN
TIPO: PROYECTO TÉCNICO

Previa a la obtención del Título de:
INGENIERO MECÁNICO

RIOBAMBA – ECUADOR

2018

ESPOCH

Facultad de Mecánica

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN DEL
TRABAJO DE TITULACIÓN**

2017-04-18

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparado por:

LLIGUAY CALDERON JOEL ENRIQUE

Titulado:

**“MANUFACTURA Y PRUEBAS DE UN PROTOTIPO DE EXOESQUELETO PARA
LA REHABILITACIÓN FÍSICA DE MIEMBROS INFERIORES PARA EL GRUPO DE
INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE BIOINGENIERÍA DE LA FACULTAD DE
MECÁNICA ESPOCH”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Ing. Carlos Santillán Mariño.
DECANO FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Geovanny Novillo Andrade
DIRECTOR

Ing. Javier Gavilanes Carrión
MIEMBRO

EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: LLIGUAY CALDERON JOEL ENRIQUE

TRABAJO DE TITULACIÓN: “MANUFACTURA Y PRUEBAS DE UN PROTOTIPO DE EXOESQUELETO PARA LA REHABILITACIÓN FÍSICA DE MIEMBROS INFERIORES PARA EL GRUPO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS EN BIOINGENIERÍA DE LA FACULTAD DE MECÁNICA ESPOCH”

Fecha de Examinación: 2018-04-05

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Ángel Rigoberto Guamán M. PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Geovanny Novillo A. DIRECTOR			
Ing. Javier Gavilanes C. MIEMBRO			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Ángel Rigoberto Guamán M.
PRESIDENTE TRIB. DEFENSA

DERECHOS DE AUTORÍA

El Trabajo de Titulación que presento, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos-científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad del autor. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Lliguay Calderon Joel Enrique

DECLARACION DE AUTENTICIDAD

Yo, Lliguay Calderon Joel Enrique, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.

Lliguay Calderón Joel Enrique
Cédula de Identidad: 060411437-1

DEDICATORIA

Todo el contenido de esta tesis está dedicado a quienes estuvieron presentes en los mejores momentos de mi vida, pero sobre todo a quienes no se alejaron de mí en los momentos de crisis.

A una mujer en especial, mi abuelita, quien con su amor y entereza me preparo desde muy niño para enfrentar los avatares de la vida y aunque ella ya no esté presente su recuerdo seguirá vivo en mi mente y corazón.

A mis padres que con humildad y bondad me dieron todo en lo emocional y económico, suficiente para llegar a este maravilloso logro que sin ustedes no hubiese sido fácil lograrlo, a mis hermanas Gaby, Anita y Ximena mis flores tan apreciadas, a mi hermano Luis Daniel por darme todo su apoyo y enseñarme el camino correcto para llegar a mi meta, a Janeth una mujer valiosa que el destino puso en mi camino a finales de mi educación secundaria y desde allí fue mi compañía hasta culminar esta etapa apoyándome con cariño y delicadeza.

También se lo dedico a todas las almas jóvenes que comienzan una carrera, conscientes de que empieza un arduo camino por recorrer, camino que no será fácil, pero tampoco imposible.

Joel Enrique Lliguay Calderon

AGRADECIMIENTO

“Porque la gratitud es prenda del alma que debe ser practicada”.

Anónimo

A DIOS por la oportunidad de vida y mirar el mundo que me fue concedido.

Agradezco al Ing. Javier Gavilanes y al Ing. Geovanny Novillo por la fe y la confianza que han depositado en mí, en el desarrollo de este proyecto de titulación aportando en mí, conocimientos para la terminación del mismo y en especial el poder ver más allá de mis alcances y expectativas.

A todos los integrantes grupo del GIEBI, en especial a los Ing. M. Aquino, S. Choto y E. Pozo por aportar su conocimiento y una excelente calidad de trabajo.

Al Ing. Miguel Escobar, por estar apoyándome hasta el final y en la travesía de este proyecto me brindo su amistad y la oportunidad de aprender junto a él, conocimientos académicos nuevos.

Un agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, a la facultad de Ingeniería Mecánica, por abrirme las puertas de su templo y brindarme una preparación académica y ahora como profesional defenderme en la vida laboral.

Joel Enrique Lliguay Calderon

CONTENIDO

RESUMEN / ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

Pág.

1.	CAPÍTULO I MARCO REFERENCIAL	1
	DEFINIDO.....	1
1.1	Antecedentes.....	1
1.2	Formulación del problema	2
1.3	Justificación.	2
1.3.1	<i>Justificación teórica</i>	2
1.3.2	<i>Justificación metodológica</i>	3
1.3.3	<i>Justificación práctica</i>	3
1.4	Alcance	3
1.5	Objetivos.....	3
1.5.1	<i>Objetivo general</i>	3
1.5.2	<i>Objetivos específicos</i>	3
2.	CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	5
2.1	Exoesqueleto y sus características en extremidades inferiores	5
2.1.1	<i>Exoesqueleto</i>	5
2.1.2	<i>Características y componentes de los exoesqueletos en miembros inferiores</i>	5
2.1.3	<i>Estructura</i>	6
2.1.4	<i>Actuadores</i>	6
2.1.5	<i>Sensores y sistema de control</i>	6
2.1.6	<i>Potencia</i>	6
2.2	Actuación de los exoesqueletos en extremidades inferiores	7
2.3	Clasificación de los exoesqueletos	7
2.3.1	<i>Modalidad pasiva o activa</i>	7
2.3.2	<i>Funcionalidad móvil o estática</i>	7
2.3.3	<i>Por número de articulaciones</i>	8
2.3.4	<i>Portabilidad</i>	8
2.4	Aplicaciones de los exoesqueletos en miembros inferiores	9
2.5	Tipos de exoesqueletos para la rehabilitación de miembros inferiores	9
2.6	Características de funcionalidad de los exoesqueletos	11

2.7	Materiales para construcción de prototipos	12
2.7.1	<i>PVC expandido</i>	12
2.7.2	<i>Metacrilato</i>	12
2.7.3	<i>Duraluminio</i>	13
2.7.4	<i>Material impresoras 3D</i>	13
2.8	Métodos de fabricación de exoesqueletos	14
2.8.1	<i>Máquinado</i>	15
2.8.2	<i>Impresora 3D</i>	15
2.9	Modelación y programación CNC	16
2.9.1	<i>CAD/CAM</i>	16
2.9.2	<i>Control numérico computarizado CNC</i>	17
2.9.3	<i>Ventajas de un sistema CNC</i>	17
2.9.4	<i>Desventajas de un sistema CNC:</i>	18
2.9.5	<i>Controladores CNC</i>	18
2.9.6	<i>Máquinas que usan el sistema CNC</i>	19
2.9.7	<i>Herramientas de una máquina CNC</i>	19
2.9.8	<i>Tipos de fresadoras CNC</i>	20
2.9.9	<i>Parámetros de corte</i>	21
2.9.10	<i>Programación de la máquina CNC</i>	24
2.9.11	<i>Parámetros del centro de mecanizado CNC Bridgeport VMC 800-22</i>	28
2.9.12	<i>Parámetros del centro de mecanizado vertical Romi D 600</i>	29
3.	CAPÍTULO III DISEÑO PARA LA MANUFACTURA Y ENSAMBLE	30
3.1	Definición de ingeniería concurrente	30
3.1.1	<i>Desde el punto de vista del producto</i>	30
3.1.2	<i>Desde el punto de vista de los recursos humanos y las metodologías</i>	30
3.1.3	<i>Desde el punto de vista de los recursos materiales</i>	31
3.2	Estudio de alternativas	31
3.2.1	<i>Requerimientos</i>	31
3.2.2	<i>Especificaciones</i>	32
3.3	Análisis de las especificaciones para el mecanismo de cadera regulable.	32
3.3.1	<i>Voz del usuario(cliente) para el mecanismo de cadera regulable</i>	32
3.3.2	<i>Voz del ingeniero para el mecanismo de cadera regulable</i>	33
3.3.3	<i>Resultados de la matriz de calidad</i>	34
3.3.4	<i>Conclusiones obtenidas de la matriz QFD</i>	35
3.4	Análisis funcional para el mecanismo de cadera.	36
3.4.1	<i>Definición de los módulos</i>	37

3.4.2	<i>Alternativas de solución.....</i>	38
3.5	<i>Alternativas del módulo.....</i>	40
3.5.1	<i>Evaluación de soluciones.....</i>	41
3.5.2	<i>Método ordinal corregido de criterios ponderados.</i>	41
3.5.3	<i>Criterios de valoración del módulo.</i>	42
3.6	<i>Análisis de las especificaciones de la grúa de rehabilitación móvil.</i>	44
3.6.1	<i>Voz del usuario (cliente) grúa de rehabilitación móvil.</i>	44
3.6.2	<i>Voz del ingeniero grúa de rehabilitación móvil.</i>	45
3.6.3	<i>Resultados de la matriz de calidad.</i>	46
3.6.4	<i>Conclusiones obtenidas mediante la realización de la matriz de la calidad</i>	47
3.7	<i>Análisis funcional para la grúa de rehabilitación móvil.</i>	48
3.7.1	<i>Definición de los módulos.....</i>	49
3.7.2	<i>Alternativas de solución.....</i>	49
3.8	<i>Alternativas del módulo.....</i>	51
3.8.1	<i>Criterios de valoración del módulo.</i>	53
3.8.2	<i>Características y elementos de la grúa de rehabilitación móvil.</i>	56
3.9	<i>Análisis de las especificaciones del exoesqueleto.</i>	57
3.9.1	<i>Grados de libertad.</i>	58
3.9.2	<i>Propiedades técnicas y especificaciones del diseño mecánico del exoesqueleto.....</i>	58
3.9.3	<i>Medidas principales del exoesqueleto.....</i>	60
3.9.4	<i>Características y elementos del diseño final de exoesqueleto.</i>	61
4.	CAPÍTULO IV MANUFACTURA.....	68
4.1	<i>Selección de materiales.....</i>	68
4.1.1	<i>Método de selección del material.....</i>	71
4.2	<i>Metodología de Michael Ashby</i>	71
4.2.1	<i>Requerimientos científico-tecnológicos.</i>	72
4.2.1.1	<i>Requerimientos específicos debe cumplir el material:</i>	72
4.2.2	<i>Índice del material para el exoesqueleto.....</i>	72
4.2.3	<i>Mapas de selección de materiales.....</i>	76
4.3	<i>Selección de los materiales del conjunto de exoesqueleto.....</i>	77
4.3.1	<i>Selección del material para la cadera y la grúa móvil de rehabilitación (estructura de cargas) del exoesqueleto y paciente</i>	77
4.3.2	<i>Selección del material para el exoesqueleto</i>	79
4.3.3	<i>Selección de materiales para los demás componentes que conforman el conjunto de exoesqueleto.....</i>	80
4.4	<i>Análisis de los torques estáticos.....</i>	81

4.5	Análisis dinámico de torques del exoesqueleto para la selección del motor en el software ADAMS VIEW.	82
4.5.1	<i>Asignación de material en Adams View</i>	82
4.5.2	<i>Conexiones de revolución y asignación de pesos de los motores</i>	83
4.5.3	<i>Selección de actuadores</i>	85
4.6	Selección de los procesos de manufactura.	87
4.6.1	<i>Procesos de manufactura</i>	87
4.7	El proceso de mecanizado	88
4.8	Variables fundamentales de un proceso de manufactura.	89
4.8.1	<i>Variables fundamentales</i>	90
4.8.2	<i>Parámetros en el proceso de mecanizado</i>	98
4.8.3	<i>Descripción general del fresado y torneado</i>	102
4.9	Selección del proceso de manufactura mediante la plataforma virtual CustomPartNet.	105
5.	CAPÍTULO V SIMULACIÓN DEL MECANIZADO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL EXOESQUELETO.....	110
5.1	Simulación del mecanizado de los componentes que conforman el exoesqueleto.....	110
5.1.1	<i>Modelación CAD</i>	110
5.1.2	<i>Calculo de velocidades y avances de corte</i>	112
5.1.3	<i>Operaciones de fresado</i>	121
5.2	Construcción de los eslabones y articulaciones del exoesqueleto.	126
5.2.1	<i>Pruebas de los procesos de fresado en madera</i>	126
5.2.2	<i>Mecanización de la plancha de grilon de 15mm de espesor</i>	128
5.2.3	<i>Mecanización de la plancha de Grilon de 25mm de espesor</i>	135
5.2.4	<i>Mecanización de los ejes</i>	140
5.2.5	<i>Construcción de las chavetas</i>	142
5.3	Construcción de la grúa de rehabilitación móvil y el mecanismo de cadera.	143
5.3.1	<i>Diagrama de bloques de procesos para la construcción de la grúa rehabilitación móvil</i>	144
5.3.2	<i>Construcción de la grúa de rehabilitación móvil</i>	146
5.3.3	<i>Diagrama de bloques de procesos para la construcción del mecanismo de cadera</i>	154
5.3.4	<i>Construcción del mecanismo de cadera</i>	156
5.3.5	<i>Flujogramas de construcción</i>	159
5.3.6	<i>Ensamble del conjunto de exoesqueleto</i>	162
5.3.7	<i>Flujograma del ensamble del conjunto de exoesqueleto</i>	170
5.4	Pruebas y análisis de resultados.	172

5.4.1	<i>Análisis y resultados de las piezas fabricadas</i>	172
5.4.2	<i>Articulación de rodilla.....</i>	173
5.4.3	<i>Pruebas del conjunto del conjunto de exoesqueleto.</i>	176
6.	CAPÍTULO VI COSTOS.....	182
6.1	Costos directos.....	182
6.1.1	<i>Costo de los materiales.</i>	182
6.1.2	<i>Costo de la mano de obra.</i>	183
6.1.3	<i>Costos de equipos y herramientas.....</i>	184
6.1.4	<i>Costo del transporte de materiales.</i>	184
6.1.5	<i>Costo total directo.</i>	184
6.2	Costos indirectos.....	185
6.3	Costo total.....	185
7.	CAPÍTULO VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	186
7.1	Conclusiones.....	186
7.2	Recomendaciones	187

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2: Tipos de exoesqueletos para la rehabilitación.....	9
Tabla 2-2: Herramientas de una máquina CNC	19
Tabla 3-2: Volumen permisible de viruta.....	23
Tabla 4-2: Descripción del número de letras.....	26
Tabla 1-3: Desarrollo de la matriz QFD del mecanismo de cadera regulable.....	35
Tabla 2-3: Criterios ponderados.....	42
Tabla 3-3: Evaluación de las soluciones (Regulación)	43
Tabla 4-3: Evaluación de las soluciones (Peso (ligero))	43
Tabla 5-3: Evaluación de las soluciones (Costos)	43
Tabla 6-3: Evaluación de las soluciones (Soporte de cargas)	43
Tabla 7-3: Tabla de conclusiones.....	44
Tabla 8-3: Desarrollo de la matriz QFD de la grúa de rehabilitación móvil.....	47
Tabla 9-3: Criterios ponderados.....	54
Tabla 10-3: Evaluación de las soluciones (Soportar el peso del paciente y los componentes)..	54
Tabla 11-3: Evaluación de las soluciones (Seguro)	55
Tabla 12-3: Evaluación de las soluciones (Económica.)	55
Tabla 13-3: Evaluación de las soluciones (Desmontable.)	55
Tabla 14-3: Tabla de conclusiones.....	55
Tabla 15-3: Propiedades técnicas.....	59
Tabla 16-3: Especificaciones del diseño mecánico.....	59
Tabla 17-3: Dimensiones principales del exoesqueleto.....	60
Tabla 1-4: Propiedades generales de los diferentes tipos de materiales.....	70
Tabla 2-4: Propiedades mecánicas del grilon.....	80
Tabla 3-4: Propiedades térmicas del grilon.....	80
Tabla 4-4: Datos del prototipo.....	81
Tabla 5-4: Tabla de torques y selección de los actuadores.....	85
Tabla 6-4: Ventajas y Desventajas del mecanizado frente a otros procesos.....	87
Tabla 7-4: Factores que influyen en el proceso de mecanizado.....	90
Tabla 8-4: Formas y algunos métodos comunes de producción.....	91
Tabla 9-4: Formas que se pueden producir en el mecanizado.....	92
Tabla 10-4: Características generales de los procesos de maquinado y tolerancias dimensionales características.....	94
Tabla 11-4: Rango de rugosidad de los procesos de mecanizado.....	96
Tabla 12-4: Rango de tamaños de los procesos de mecanizado.....	96
Tabla 13-4: Material de la herramienta.....	97

Tabla 14-4: Velocidades recomendadas para los procesos de mecanizado.....	98
Tabla 15-4: Rangos de acabado superficial.....	100
Tabla 16-4: Costos del proceso de mecanizado.....	101
Tabla 17-4: Cantidades del proceso de mecanizado.....	102
Tabla 18-4: Fresado.....	103
Tabla 19-4: Torneado.....	104
Tabla 20-4: Procesos de manufactura de la plataforma.....	106
Tabla 1-5: Valores de la herramienta.....	112
Tabla 2-5: Valores de la herramienta.....	114
Tabla 3-5: Valores de la herramienta.....	115
Tabla 4-5: Valores de la herramienta.....	116
Tabla 5-5: Valores de la herramienta.....	117
Tabla 6-5: Valores de la herramienta.....	118
Tabla 7-5: Valores de la herramienta.....	119
Tabla 8-5: Valores de la herramienta.....	120
Tabla 9-5: Operaciones de fresado para la plancha de 15 mm primera cara.....	121
Tabla 10-5: Operaciones de fresado para la plancha de 15 mm segunda cara.....	122
Tabla 11-5: Operaciones de fresado para la plancha de 25 mm primera cara.....	123
Tabla 12-5: Operaciones de fresado para la plancha de 25 mm segunda cara.....	124
Tabla 13-5: Descripción de los procesos de fresado en madera.....	127
Tabla 14-5: Descripción de los procesos de fresado de la plancha de grilon de 15mm	128
Tabla 15-5: Descripción de los procesos de fresado de la plancha de grilon de 25mm.....	135
Tabla 16-5: Descripción de los procesos de mecanizado de los ejes.....	140
Tabla 17-5: Descripción de los procesos de construcción de las chavetas.....	143
Tabla 18-5: Descripción de los procesos de construcción de la grúa móvil.....	146
Tabla 19-5: Descripción de los procesos de construcción del mecanismo de cadera.....	156
Tabla 20-5: Ensamble del conjunto de exoesqueleto motores, eslabones, articulaciones y componentes.....	162
Tabla 21-5: Ensamble de la grúa móvil de rehabilitación.....	164
Tabla 22-5: Ensamble del conjunto de la cadera y el exoesqueleto.....	170
Tabla 23-5: Tiempo total de la construcción.....	171
Tabla 24-5: Análisis y resultados de las piezas fabricadas.....	172
Tabla 25-5: Pruebas en vacío del conjunto del conjunto de exoesqueleto.....	177
Tabla 26-5: Pruebas con carga parcial del conjunto del conjunto de exoesqueleto.....	180
Tabla 27-5: Pruebas mecánicas del conjunto de exoesqueleto.....	181
Tabla 1-6: Costos de los materiales.....	183
Tabla 2-6: Costos de mano de obra.....	184

Tabla 3-6: Costos de equipos y herramientas.....	184
Tabla 4-6: Costo total directo.....	185
Tabla 5-6: Costo total directo.....	185
Tabla 6-6: Costo total.....	186

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2: Láminas de PVC	12
Figura 2-2: Metacrilato	13
Figura 3-2: Planchas de duraluminio	13
Figura 4-2: Máquinado de una pieza.....	15
Figura 5-2: Impresora 3D	16
Figura 6-2: Fresado en concordancia o hacia abajo	21
Figura 7-2: Fresado en oposición o hacia arriba.	21
Figura 8-2: Planos de construcción CNC.....	25
Figura 9-2: Centro de mecanizado CNC Bridgeport VMC 800-22.....	28
Figura 10-2: Centro de mecanizado vertical Romi D 600.....	29
Figura 1-3: Función primaria del mecanismo de cadera regulable.....	36
Figura 2-3: Diagrama de las funciones secundarias del mecanismo de cadera regulable.....	37
Figura 3-3: Diagrama de las funciones secundarias del mecanismo de cadera regulable.....	37
Figura 4-3: Soporte de cargas de los componentes y del paciente.....	38
Figura 5-3: Ajuate a la grúa de rehabilitación móvil.....	39
Figura 6-3: Montar los componentes del exoesqueleto.....	39
Figura 7-3: Acople al paciente.....	39
Figura 8-3: Posibles alternativas de solución del mecanismo de cadera.....	40
Figura 9-3: Primera alternativa del mecanismo de cadera regulable.....	41
Figura 10-3: Segunda alternativa del mecanismo de cadera regulable.....	41
Figura 11-3: Función primaria de la grúa de rehabilitación móvil	48
Figura 12-3: Diagrama de las funciones secundarias de la grúa de rehabilitación móvil.....	48
Figura 13-3: Diagrama de las funciones secundarias de la grúa de rehabilitación móvil.....	49
Figura 14-3: Grúa con el exoesqueleto.....	50
Figura 15-3: Elevación del paciente.....	51
Figura 16-3: Posibles alternativas de solución de la grúa de rehabilitación móvil.....	52
Figura 17-3: Primera alternativa de la grúa de rehabilitación móvil.....	53
Figura 18-3: Segunda alternativa de la grúa de rehabilitación móvil.....	53
Figura 19-3: Sistema de elevación del paciente.....	56
Figura 20-3: Estructura desmontable.....	57
Figura 21-3: Tubos de empuñadura.....	57
Figura 22-3: Medidas principales del exoesqueleto.....	60
Figura 23-3: Exoesqueleto final.....	61
Figura 24-3: Cadera exoesqueleto.....	61
Figura 25-3: Articulación de cadera externa.....	62

Figura 26-3: Articulación de cadera interna.....	62
Figura 27-3: Eslabón muslo superior.....	63
Figura 28-3: Eslabón muslo inferior.....	63
Figura 29-3: Articulación de rodilla externa.....	64
Figura 30-3: Articulación de rodilla interna.....	64
Figura 31-3: Eslabón pantorrilla superior.....	65
Figura 32-3: Eslabón pantorrilla inferior.....	65
Figura 33-3: Articulación tobillo externo.....	66
Figura 34-3: Tobillo interno.....	66
Figura 35-3: Eslabón tobillo-pie.....	67
Figura 36-3: Pie.....	67
Figura 1-4: Diagrama de bloques del proceso de diseño.....	70
Figura 2-4: Fuerzas de compresión aplicadas al exoesqueleto.....	73
Figura 3-4: Prisma rectangular.....	74
Figura 4-4: Mapa Ashby esfuerzo vs densidad.....	76
Figura 5-4: Tubo estructural rectangular y cuadrado negro.....	78
Figura 6-4: Tubo estructural redondo negro.....	78
Figura 7-4: Varilla circular lisa de acero negro.....	81
Figura 8-4: Platina de acero negro.....	81
Figura 9-4: Posición inicial y posición final crítica.....	82
Figura 10-4: Conectores y asignación de fuerzas.....	83
Figura 11-4: Parámetros asignados cadera.....	83
Figura 12-4: Parámetros asignados rodilla.....	84
Figura 13-4: Parámetros asignados rodilla.....	84
Figura 14-4: Wincha y tecele.....	86
Figura 15-4: Clasificación de todos los procesos de producción.....	87
Figura 16-4: Irregularidades geométricas.....	93
Figura 17-4: Tolerancias geométricas.....	93
Figura 18-4: Tolerancias dimensionales en función del tamaño de la parte para diversos procesos de manufactura.....	94
Figura 19-4: Ejemplos de rugosidad.....	95
Figura 20-4: Ingreso de datos de variables de mecanizado.....	107
Figura 21-4: Selección del proceso de mecanizado.....	108
Figura 22-4: Ingreso de datos de variables de mecanizado.....	109
Figura 23-4: Selección del proceso de mecanizado.....	109
Figura 1-5: Vista frontal.....	110
Figura 2-5: Vista posterior.....	110

Figura 3-5: Vista isométrica	111
Figura 4-5: Vista frontal.....	111
Figura 5-5: Vista posterior.....	111
Figura 6-5: Vista isométrica.....	111
Figura 7-5: Pruebas en madera.....	128
Figura 8-5: Diagramas de procesos.....	145
Figura 9-5: Diagramas de procesos.....	156
Figura 10-5: Flujograma de construcción del exoesqueleto con la plancha de 15 mm.....	160
Figura 11-5: Flujograma de construcción del exoesqueleto con la plancha de 25 mm.....	160
Figura 12-5: Flujograma de construcción de los ejes.....	161
Figura 13-5: Flujograma de construcción de las chavetas.....	161
Figura 14-5: Flujograma de construcción de la grúa de rehabilitación.....	161
Figura 15-5: Flujograma de construcción del mecanismo de cadera.....	162
Figura 16-5: Flujograma de montaje en general.....	171

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfica 1-4: Torque en articulación de cadera.....	83
Gráfica 2-4: Torque en articulación de rodilla.....	84
Gráfica 3-4: Torque en articulación de tobillo.....	85

SIMBOLOGÍA

A	Área	m^2
b	Longitud	m
E	Módulo de elasticidad	GPa
fn	Avance por vuelta	$\frac{mm}{rev}$
K_{ic}	Tenacidad a la fractura	$MPa\ m^{1/2}$
m	Masa	Kg
T_g	Temperatura de transición vítrea	$^{\circ}C$
T_m	Punto de fusión	$^{\circ}C$
V_c	Velocidad de corte	$\frac{m}{min}$
V_a	Volumen admisible	cm^3
V_f	Velocidad de avance	$\frac{mm}{min}$
P	Potencia teórica	Kw
P_e	Potencia efectiva	Kw
σ_y	Esfuerzo de fluencia o limite elástico	Pa
ρ	Densidad	$\frac{kg}{m^3}$
V	Volumen	m^3
S_z	Avance por diente	$\frac{mm}{diente}$
M	Índice de merito	

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A. Información respetiva de los motores

ANEXO B. Casa de la calidad del mecanismo de cadera y grúa móvil

RESUMEN

El propósito de este proyecto de titulación fue crear un prototipo funcional de exoesqueleto con 6 grados de libertad para realizar rehabilitación física en miembros inferiores. El proyecto fue realizado por el grupo de investigación y estudios en bioingeniería (GIEBI) de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH, encaminado a mejorar las herramientas que han revolucionado el campo de la medicina, desarrollando diferentes mecanismos que ayudan a mejorar los procedimientos de rehabilitación en miembros inferiores, en donde hubo una recopilación de información que involucraba la evolución de los exoesqueletos para miembros inferiores hasta los más novedosos de hoy en día, se indagó la teoría necesaria para la comprensión de algunos temas y con el objetivo de realizar los análisis correspondientes para el diseño del exoesqueleto y su respectiva manufactura. Se realizó la descripción antropométrica y patológica del miembro inferior, de un paciente con discapacidad en donde el paciente no coordina los movimientos de la marcha al caminar. Se efectuó la modelación CAD del rediseño del exoesqueleto, en SolidWorks para la simulación y programación en NX, añadiendo a este aporte una grúa de rehabilitación móvil. Una vez cumplido los requerimientos del usuario, se procedió a realizar la selección de los actuadores para ello se analizó en los movimientos más críticos de la pierna y se exportó a MSC Adams para que en las gráficas de las articulaciones de la pierna analizar los torques más cercanos. Para poder evaluar si el material elegido es el más adecuado para la aplicación que se le quiere dar al dispositivo se usó el método de Ashby. Se construyó la grúa móvil de rehabilitación y se mecanizó las piezas en una fresadora cnc de 3 ejes para su respectivo ensamble del exoesqueleto, luego de ello se verificó que las piezas y las dimensiones sean las adecuadas para que se genere una trayectoria de marcha similar a la marcha real de una persona sana. El movimiento de los eslabones que conforman el exoesqueleto se realizó con actuadores eléctricos que en este caso eran motores de paso accionados con su respectivo control. Y para finalizar, se realiza la simulación y pruebas mecánicas donde se concluyó con la simulación de la marcha resultando los movimientos de cadera: +21 a -15 grados, rodilla: 0 a 39 grados, tobillo: +18 a -18 grados y se recomienda el cambio de actuadores con mejoras y avances para nuevas investigaciones del mismo grupo de investigación (GIEBI) en la construcción final del prototipo.

PALABRAS CLAVES: <EXOESQUELETO>, <PROTOTIPO>, <MANUFACTURA>, <REHABILITACIÓN>, <SIMULACIÓN>, <PRUEBAS MECÁNICAS>.

ABSTRACT

The purpose of this titling project was to create a functional exoskeleton prototype with 6 degrees of freedom to perform physical rehabilitation in lower limbs. The project was carried out by the group of research and studies in bioengineering (GIEBI) of the School of Mechanics of the ESPOCH aimed at improving the tools that have revolutionized the field of medicine, developing different mechanisms that help to improve rehabilitation procedures in inferior members, where there was a compilation of information that involved the evolution of exoskeletons for lower members to the most innovative of today, the theory was queried to understand some issues and with the aim of performing the corresponding analyzes for the design of the exoskeleton and its respective manufacture. The anthropometric and pathological description of the lower limb was made, of a patient with a disability where the patient does not coordinate the movements of the walking gait. The CAD modeling of the exoskeleton redesign was carried out in SolidWorks for the simulation and programming in NX, adding to this contribution a mobile rehabilitation crane. Once the user's requirements were met, the selection of actuators was carried out. For this purpose, the most critical movements of the leg were analyzed and exported to MSC Adams so that in the graphs of the joints of the leg, the torques could be analyzed. close. In order to evaluate if the chosen material is the most suitable for the application that is wanted to give the device the Ashby method was used. The mobile rehabilitation crane was built and the parts were machined in a 3-axis cnc milling machine for its respective assembly of the exoskeleton, after which it was verified that the parts and dimensions are adequate to generate a similar trajectory of travel. the actual march of a healthy person. The movement of the links that make up the exoskeleton was made with electric actuators that in this case were step motors driven with their respective control. And finally, the simulation and mechanical tests were carried out where the simulation of the march was concluded giving them hip movements: +21 to -15 degrees, knee: 0 to 39 degrees, ankle: +18 to -18 degrees and it is recommended the change of actuators with improvements and advances for new investigations of the same research group (GIEBI) in the final construction of the prototype.

KEYWORDS: <EXOSKELETON>, <PROTOTYPE>, <MANUFACTURE>, <REHABILITATION>, <SIMULATION>, <MECHANICAL TESTS>.

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta como propuesta técnica, un prototipo capaz de simular la marcha para la rehabilitación física en miembros inferiores para estudios de un prototipo final. En el presente proyecto de investigación, se realizaron modificaciones pertinentes en base a más estudios y mejoras actuales ya que el prototipo de exoesqueleto que ahora se pretende fabricar en comparación al anterior estudio, se muestra que el tipo de rehabilitación en los miembros inferiores es de forma estática, es decir que la cadera y sus eslabones permanecen con el paciente y para conseguirlo se elevará a una cierta distancia del piso con ayuda de una grúa móvil de rehabilitación (estructura que soporta el peso del exoesqueleto y de la persona) con la finalidad de todos sus movimientos como Flexión-Extensión sea realizado con más facilidad.

Para este proyecto se ha logrado seleccionar los procesos de manufactura para la construcción utilizando criterios adecuados y recomendados en el diseño modificado y mejorado del exoesqueleto; se analizará una nueva selección de materiales para la construcción del exoesqueleto y se realizará el cálculo de los torques en cada articulación de la pierna medidos en Adams para que de esta forma se pueda seleccionar el actuador a utilizar, luego de lo cual se procede a la fabricación y montaje.

Este prototipo en cada articulación utiliza motores de paso nema para mover el mecanismo de exoesqueleto y el exoesqueleto consta con 6 grados de libertad.

Para la simulación del mecanizado se analizará en el software NX 11 Siemens, previamente se necesita el modelado del proyecto que por facilidad se realizó en SolidWorks y se guarda en formato .step o .igs para seguidamente trasladar al software NX para su respectiva construcción.

CAPÍTULO I

1. MARCO REFERENCIAL

1.1 Antecedentes

El mayor problema que puede sufrir un ser humano para poder realizar sus actividades con normalidad es la pérdida de fuerza en sus músculos , más conocido como parálisis parcial en sus extremidades (inferiores o superiores), que para ello existen herramientas que han revolucionado el campo de la medicina, desarrollando diferentes mecanismos que ayudan a mejorar los procedimientos de rehabilitación actuales, permitiendo así una recuperación de mayor calidad en el paciente , para permitir mejorar la calidad de vida de las personas (Grosso, et al., 2009) que han sufrido daños en sus extremidades por enfermedades, vejez, lesiones o accidentes de tránsito.

En los últimos años los centros médicos a nivel nacional e internacional han establecido desarrollar estructuras mecánicas que permiten mejorar las condiciones de los pacientes con parálisis conocidos como exoesqueletos.

Un exoesqueleto se denomina todo aquel que tenga un sistema biomecatrónico donde el mecanismo está adaptado a la estructura física del cuerpo humano, con un control activo que toma señales de mando y de movimiento para ejercer sus correspondientes acciones para las cuales están diseñados.

Una de las ramas de la robótica está destinada a crear dispositivos versátiles para estimular el movimiento o incrementar la fuerza de los miembros corporales. Estos dispositivos son llamados “exoesqueletos”.

El exoesqueleto es un trabajo robótico, que resulta ser en si unas piernas mecánicas que en su situación de discapacidad se lo ponen y este permite levantarse y caminar. El prototipo del exoesqueleto será construido y usado para investigaciones adicionales del mismo grupo para hacer un exoesqueleto de las extremidades inferiores que funcione.

Este proyecto describe el modelo, control y simulación de un exoesqueleto para rehabilitación de pacientes con daños motores causados por una lesión durante el desarrollo de un cerebro inmaduro, el cual tiene como objetivo optimizar la terapia de rehabilitación y con ella la recuperación del paciente.

El exoesqueleto se utilizará para la rehabilitación de pacientes con trastornos de movilidad en sus extremidades inferiores, como los pacientes con hemiplejía. Los estudios demuestran que la rehabilitación, con la ayuda del exoesqueleto, es más eficaz que las formas más tradicionales. El uso del exoesqueleto también permitirá a un fisioterapeuta centrarse más en el paciente y la rehabilitación que el movimiento real de los miembros o el cuerpo.

1.2 Formulación del problema

Manufacturar y evaluar la funcionalidad de un prototipo funcional para validar los datos de una investigación previa, dentro del GRUPO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIO EN BIOINGENIERÍA “GIEBI” y que a su vez permitan servir como base para futuros estudios del mismo grupo.

En la investigación anterior consistió en desarrollar el modelo cinemático, dinámico y estructural de un prototipo de exoesqueleto para ser utilizado en terapias físicas de pacientes que por accidentes o por problemas neurológicos sufren una deficiencia en el funcionamiento de sus miembros inferiores.

Como dato adicional de este proyecto, se tiene un enfoque en los discapacitados de la ciudad de Riobamba ya que en la actualidad en el Ecuador existen 175.473 personas con discapacidad física, en la ciudad de Riobamba existen 2603 personas con discapacidad física según datos del CONADIS. En el país si una persona ha perdido la movilidad parcial de sus miembros inferiores se ve obligada a utilizar aparatos ortopédicos como sillas de ruedas, andadores o en el mejor de los casos bastones, pero ninguno de estos les ayuda a recuperar la movilidad de sus miembros o a mejorar la calidad de la terapia física.

El uso de dispositivos ortopédicos como sillas de ruedas, andadores o bastones puede resultar cansado, doloroso, difícil e incluso peligroso para las personas, en el caso de recorrer largas distancias, pasar por pasillos angostos, o utilizar escaleras. (CONADIS, 2016).

1.3 Justificación.

1.3.1 Justificación teórica

El diseño debe estar sujeto a argumentos teóricos adquiridos a partir de estudios previos como antropometría, marcha humana, locomoción, extremidades inferiores y marcha humana.

También incluir análisis mecánicos y dinámicos de forma tal que con herramientas computacionales se pueda conocer una aproximación del comportamiento del mecanismo antes de ser construido. Finalmente se realizarán reportes sobre los datos obtenidos en los estudios en todas las fases del proyecto.

1.3.2 *Justificación metodológica*

El estudio del proyecto se basaría en la reducción de costos, sin el sacrificio del rendimiento, así como implementación de técnicas de construcción-calidad que suministraran valor funcional a cada uno de los componentes que hacen parte del exoesqueleto.

1.3.3 *Justificación práctica*

En un futuro este proyecto puede ser incluido en áreas de fisioterapia de hospitales, ya que con estos se permite mejorar las sesiones de terapia física moviendo los músculos de los miembros y simulando su movimiento natural.

1.4 Alcance

La máquina está diseñada para cumplir con los requerimientos establecidos, además servirá como un prototipo para futuros rediseños y mejoras en la misma.

1.5 Objetivos

1.5.1 *Objetivo general*

Manufacturar y probar un prototipo de exoesqueleto para la rehabilitación física de miembros inferiores para el GRUPO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE BIOINGENIERÍA “GIEBI” DE LA FACULTAD DE MECÁNICA.

1.5.2 *Objetivos específicos*

Examinar el estado del arte correspondiente a los desarrollos tecnológicos en el área de exoesqueletos para rehabilitación.

Modelar un prototipo virtual de exoesqueleto mediante un software CAD y realizar la construcción del mismo.

Estudiar y seleccionar los procesos de manufactura para la construcción de un prototipo de exoesqueleto.

Seleccionar los materiales para cada elemento del exoesqueleto considerando los procesos de manufactura adecuados.

Desarrollar las pruebas mecánicas del prototipo de exoesqueleto.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se desarrolla de una manera sintética los conceptos específicos, en donde están las aplicaciones relacionados con la construcción y manufactura que se involucran en este proyecto. Para la adquisición significativa de conceptos, se realiza un estudio bibliográfico de exoesqueletos comerciales y aprobados a nivel mundial y local, en el que se base y haga referencia al diseño detallado tanto mecánico y electrónico, para la correcta determinación de los materiales a emplear y los actuadores, siendo pilar fundamental para la determinación de torques y cálculo de potencias para el exoesqueleto. Esta selección además de realizarse claramente en el campo ingenieril, también se debe tener en cuenta las consideraciones económicas, conjuntamente tomando en cuenta todo lo indicado será un aporte a este trabajo de titulación.

2.1 Exoesqueleto y sus características en extremidades inferiores

2.1.1 *Exoesqueleto*

Un esqueleto que se encuentra sostenida externamente al cuerpo, así como lo llevan algunos insectos. Según los conceptos de (Emmer, 2013) y (López, et al., 2014) se dice que, un exoesqueleto se define como un sistema electro-mecánico externo, ergonómico que posee articulaciones capaces de aumentar fuerza o mejorar capacidades motoras, en donde puede trabajar en forma coordinada con los movimientos ejercidos por el sujeto o por el sistema. Los exoesqueletos usualmente son diseñados para permitir caminar o aumentar la fuerza y resistencia a las personas con desordenes de movilidad.

2.1.2 *Características y componentes de los exoesqueletos en miembros inferiores*

Para que un exoesqueleto tenga una gran eficiencia durante su funcionamiento se debe tomar en cuenta que al momento de la construcción y control tenga todos los componentes tomando en cuenta sus características, si uno falla fallara todo el sistema entre ellos están:

- Estructura
- Actuadores
- Sensores y sistema de control

- **Potencia**

2.1.3 Estructura

Principalmente elaborada con materiales ligeros, el marco debe ser lo suficientemente fuerte para sostener el peso del cuerpo, así como el peso del exoesqueleto y sus componentes. La estructura su vez debe sostener el cuerpo en su lugar de una manera segura sin el riesgo que quien lo usa sufra daños, agravado más su lesión. La estructura usualmente tiene una serie de uniones las cuales coinciden con las uniones del cuerpo, en la cadera, la rodilla y tobillo. (Emmer, 2013)

2.1.4 Actuadores

Si se hace referencia la estructura es como los huesos del cuerpo y el controlador el cerebro, se podría decir que los actuadores son como los músculos que ejercen el movimiento. Los actuadores son usualmente motores eléctricos o hidráulicos. Usando la energía de las baterías y la información enviada por la computadora, los actuadores mueven el exoesqueleto y la persona que lo usa.

2.1.5 Sensores y sistema de control

Al hablar de sensores se podría decir que estos capturan la información sobre como el usuario desea moverse. Los sensores pueden ser manuales, como una palanca, o pueden ser eléctricos y detectar los impulsos fisiológicos generados por el cuerpo, o los sensores pueden estar combinados con dispositivos como un control remoto y un detector de movimiento que permite a quien lo usa cambiar el movimiento de caminar a subir gradas. La información capturada por los sensores es enviada a la computadora para ser analizada.

En caso de un controlador, actúa como el cerebro del dispositivo, el controlador es una computadora a bordo la cual toma la información capturada por los sensores y controla a los actuadores. La computadora coordina a los distintos actuadores en el exoesqueleto y permite al exoesqueleto y su usuario, pararse, caminar, subir o descender. (Emmer, 2013)

2.1.6 Potencia

En la electrónica de potencia es un aspecto de gran importancia, puesto que significa el paso del control a la actuación, se podría decir que en esta etapa de actuación es donde la etapa de electrónica de potencia tiene su mayor relevancia, pues sin este, el lazo estará roto y sencillamente el sistema no puede funcionar.

La etapa de potencia consiste en la forma en que los actuadores van a funcionar con sus requerimientos técnicos, pero a partir de un controlador.

2.2 Actuación de los exoesqueletos en extremidades inferiores

El exoesqueleto debe actuar en función de los movimientos del cuerpo y el equilibrio durante la fase de la caminata, y esto se consigue tomando en cuenta que el exoesqueleto y el usuario tengan una debida trayectoria durante la oscilación de este, la cual debe ser igual o la misma con la del usuario, ya que este esta acoplada al cuerpo humano.

2.3 Clasificación de los exoesqueletos

La clasificación de los exoesqueletos se puede realizar por diferentes factores, los más relevantes que son de modalidad pasiva, funcionalidad móvil por el número de articulaciones y portabilidad.

2.3.1 *Modalidad pasiva o activa*

Es una característica referente a la forma en la que se genera el primer movimiento de ruptura inercial; para que esta característica se active el exoesqueleto debe ser excitado por un impulso eléctrico muscular, neuronal o por un mínimo movimiento detectable por la sensórica quien le informa la unidad de control la intención del paciente por mover esa parte de su cuerpo, de esta manera el control envía señales de activación a los actuadores y estos proceden a generar uno o varios ciclos de marcha dependientes de la programación del robot. La modalidad activa se emplea para rehabilitación muscular en la que el paciente debe ejercitarse; también es usado en el campo militar donde basta de un impulso por ciclo de marcha para que el exoesqueleto genere movimiento. Para el caso en que el dispositivo es pasivo, el exoesqueleto empieza su movimiento sin necesidad de recibir impulsos musculares o neuronales del paciente, basta con un presionar un botón para indicarle al exoesqueleto que se quiere iniciar el ciclo de marcha y este empezara a hacerlo, este tipo de exoesqueletos de modalidad pasiva son empleados para realizar terapia repetitiva y estimulación vascular en extremidades. (State classification and motion description, 2014)

2.3.2 *Funcionalidad móvil o estática*

Esta funcionalidad hace referencia al diseño de exoesqueletos que están contruidos de forma que le den o no movilidad al usuario. Los estáticos son exoesqueletos desarrollados en un ambiente de rehabilitación debido a que estos generalmente tienen una estructura de apoyo para los pacientes y emplean el uso de una banda caminadora para ejercitar al paciente con el ciclo de marcha.

Para el caso de los exoesqueletos móviles que son la mayoría, estos ofrecen un nivel elevado de autonomía en desplazamientos, generalmente este tipo de exoesqueletos es empleado en la industria militar y en una parte comercial, la limitante de este tipo de exoesqueletos es sin duda la duración del sistema de suministro debido a que la mayoría de estos dependen del funcionamiento de circuitos electrónicos y debido a que aún no se han implementado los avances de las baterías de alta duración podemos decir que este es el factor limitante de este tipo de dispositivos. (State classification and motion description, 2014)

2.3.3 Por número de articulaciones

Clasificación por número de articulaciones, los exoesqueletos son definidos por su número de grados de libertad generalmente un modelo completo de miembros inferiores consta de treinta y seis (36) grados de libertad distribuidos de la siguiente manera, Diez (10) en dedos, tres (3) en la articulación del tobillo, 2 en la rodilla, 3 en la cadera, lo mismo para la otra pierna. Por este motivo se maneja un modelo simplificado de siete grados de libertad los cuales son, tres (3) para el tobillo articulación tipo esfera, uno (1) para la rodilla articulación tipo revolución, tres (3) para la cadera tipo esfera. Se puede simplificar aún más el modelo si se escogen los grados referentes a cada plano corporal, muchos estudios están basados en la selección del plano sagital por tal motivo la cantidad de grados a modelar se ve reducida a las componentes de un péndulo doble o triple dependiendo el caso de estudio. (State classification and motion description, 2014)

2.3.4 Portabilidad

La portabilidad es relevante en este tipo de desarrollos debido a la gran cantidad de material y componentes que tiene cada exoesqueleto, una vez definido el tipo de exoesqueleto que se quiere diseñar se debe contemplar la variable portabilidad ya sea para exoesqueletos fijos o móviles, para los exoesqueletos fijos la portabilidad se ve sujeta al espacio en donde se desea accionar el dispositivo, esta es la principal limitación existirán limitaciones diferentes que por lo general son están establecidas por la persona que requiere el dispositivo.

Para el caso de los exoesqueletos móviles es muy importante esta variable, debido a que la mayoría de estos deben ser cargados y accionados por el usuario, en algunos casos de rehabilitación la portabilidad no se hace tan crítica debido a que la persona se encuentra en un ambiente controlado, aunque de igual forma debe ser liviano, cómodo y de buena autonomía en todo sentido. (State classification and motion description, 2014)

2.4 Aplicaciones de los exoesqueletos en miembros inferiores

La aplicación que se dará más enfoque en este trabajo de titulación es en el área de rehabilitación física. Sin embargo, varios investigadores han demostrado que la cantidad, duración, contenido e intensidad de las sesiones de entrenamiento son variables importantes en el reaprendizaje de las habilidades motoras y en el cambio de la arquitectura neuronal.


De hecho, se ha observado que cuando el tratamiento presenta mayor intensidad que lo acostumbrado, se obtienen mejores resultados, que repercuten en la calidad de vida del paciente. Desafortunadamente, cuando la terapia se proporciona en un hospital o centro de rehabilitación, la duración de las sesiones suele ser de una hora, dos o tres veces a la semana. (Consorcio Opensurg, 2013)

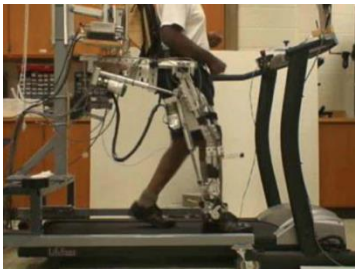
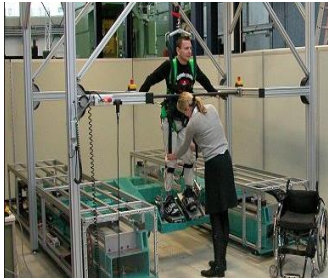



En los últimos años se han desarrollado estructuras mecánicas que permiten mejorar las condiciones de los pacientes con parálisis, conocidas como exoesqueletos. Estos poseen sensores conectados al paciente y actuadores que son análogos a las funciones del cuerpo, todos estos elementos pueden actuar como un solo sistema integrado que puede desarrollar variadas actividades, dándole sensación de autonomía al paciente. Estos dispositivos no requieren soportar mucho peso, tan solo el del usuario, en este tipo de aplicación, por lo tanto, se espera que este sistema ayude al movimiento natural de la persona, esto también dependerá de las sesiones de terapias.

Cabe mencionar que existe otras dos aplicaciones que son: en el área militar y comercial.

2.5 Tipos de exoesqueletos para la rehabilitación de miembros inferiores

Tabla 1-2: Tipos de exoesqueletos para la rehabilitación

FIGURA	SISTEMA	TIPO	DETALLES
	GBO (Gravity Balancing Orthosis)	Exoesqueleto	Es un sistema pasivo que utiliza la compensación mecánica de la fuerza gravedad sin necesidad de actuadores en las articulaciones, el propio paciente controla los movimientos de rehabilitación a velocidades bajas es en donde predomina esta fuerza.

	ALEX	Exoesqueleto	Es un sistema rehabilitador en las articulaciones de cadera y rodilla controlado con servomotores que ayudan al pie a conseguir una trayectoria correcta.
	HAPTIC WALKER	Basado en efector final	Es un dispositivo háptico como sistema rehabilitador basado en efector final diseñado con 6+1 grados de libertad para cada pie. El peso del paciente se elimina mediante un sistema pasivo de compensación de peso.
	LOKOMAT	Exoesqueleto	Es un sistema de realidad virtual tanto gráfica como auditiva actuado mediante motores eléctricos en las articulaciones en la cadera y rodilla. Para mantener al paciente erguido dispone de un sistema de compensación de peso mediante resortes y poleas.
	REOAMBULATOR	Exoesqueleto	Es un sistema de realidad virtual, actuado mediante motores eléctricos y permite tener piernas robóticas sincronizadas.
	CAREN	Entorno de rehabilitación	Es un sistema virtual con video y sonido Es un sistema de entorno de rehabilitación basado en una plataforma robótica paralela de 6 grados de libertad con motores hidráulicos.

Realizado por: Joel Lliguay;2018.

Fuente: Consorcio, Opensurg. 2013. *Robótica médica-Notas prácticas para el aprendizaje de la robótica en bioingeniería*. Elche : CYTED, 2013. pág. 301. I.S.B.N.: 978-84-15413-12-7.

2.6 Características de funcionalidad de los exoesqueletos

La funcionalidad de los exoesqueletos está determinada por varios factores de gran importancia y sobre los cuales es necesario hablar y definir. La funcionalidad de este tipo de robots está dada y limitada por varios aspectos generales algunos como: área de accionamiento, cantidad de grados de libertad, ciclos de trabajo.

El área de accionamiento de un exoesqueleto debe ser definido por el desarrollador quien determina si el exoesqueleto es diseñado para que se mueva realizando ciclos de marcha sin traslado, o con traslado, generalmente los dispositivos que no poseen desplazamiento son empleados para la rehabilitación, los que si se desplazan son utilizados para aplicaciones militares o laborales, aunque actualmente esto empieza a cambiar y la movilidad se está dando en todos los campos que emplean estos dispositivos. La cantidad de grados de libertad, esta es la característica que define fundamentalmente el diseño del exoesqueleto según la cantidad de grados de libertad, se definen variables estructurales, actuadores, sensores, selección de materiales, el modo de funcionamiento activo o pasivo, rehabilitador o para incrementar características funcionales de personas, esta característica es el comienzo del diseño de un exoesqueleto. Los ciclos de trabajo influyen en la funcionalidad el dispositivo debido a que determinan con qué tipo de materiales y que actuación requiere el exoesqueleto, esto se debe a que los exoesqueletos son diseñados para diferentes aplicaciones , por ejemplo en caso de un exoesqueleto de rehabilitación el ciclo de trabajo puede ser una secuencia terapéutica repetitiva durante un tiempo no muy prolongado, debido a que el paciente debe ejercitar y luego descansar de esta forma se logra una recuperación satisfactoria, pero para el caso de la industria militar el exoesqueleto debe ser exigido a condiciones, tiempos prolongados y cargas demandantes las cuales hacen que este diseño deba ser muy robusto y los materiales seleccionados deben ser preparados para condiciones extremas.

Para el caso militar por ejemplo un exoesqueleto deberá proporcionar al individuo un aumento de fuerza, velocidad y sus movimientos deben de alta intensidad sin lastimar al usuario, los sistemas electrónicos deben estar contruidos con una robustez y un factor de seguridad muy alto, ciclos de carga extensos, debido a las condiciones a las cuales se verán expuestos los dispositivos. Para el caso medico el robot debe tener un diseño especialmente ajustable a la necesidad del paciente, debe brindarle al paciente la capacidad motriz necesaria y suficiente para poder realizar ejercitación terapéutica de marcha, este dispositivo debe tener actuadores de alta precisión debe estar construido con materiales adecuados para ambientes médicos, tales como materiales resistentes a sustancias, fluidos entre otros, debe ser de fácil accionar y debe ser de fácil transporte, los movimientos que describa este dispositivo deben graduables según las etapas de evolución del paciente.

En un ámbito investigativo la importancia del exoesqueleto radica en la correcta validación de la construcción, la distribución de sensores, los tipos de accionamientos mecánicos y electrónicos, verificación experimental de diferentes situaciones simuladas que brinden una amplia recolección de información, esto para poder establecer parámetros iniciales y finales sobre los materiales, actuadores, sensores, mecanismos, estrategias de control, a implementar en próximos proyectos. (Ruiz Olaya, 2009)

2.7 Materiales para construcción de prototipos

En esta parte se detallará y se dará a conocer los materiales que comúnmente son usados para la manufactura de robots, prótesis y exoesqueletos que comúnmente usan los centros de investigación, centros educativos y estudiantes apasionados al arte de la construcción de los robots y prototipos.

Hay que tomar en cuenta que estos materiales son seleccionados en la mayoría empíricamente ya sea basados en la práctica, experiencia de construcción de otros proyectos por su alta resistencia en sí del material, precio y por ser asequible al momento de ser utilizados.

2.7.1 PVC expandido

También llamado Forex o PVC espumado, es un plástico derivado del vinilo. Se trata de un material resistente, ligero y fácil de mecanizar, ya que se puede cortar simplemente con un cúter. Se vende en láminas de diferentes tamaños y grosores. Para nuestra aplicación, un grosor de 3mm puede ser lo más adecuado.

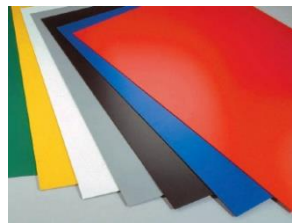


Figura 1-2: Láminas de PVC
Fuente: <http://roboticasunyer.blogspot.com/2012/12/>

2.7.2 Metacrilato

Se trata de un tipo de plástico, también conocido como acrílico de vidrio. Al igual que el PVC expandido, es un plástico ligero pero resistente, aunque es más difícil de mecanizar. Se vende en planchas o láminas de diferentes tamaños y grosores, desde 2 mm hasta 120 mm. Para nuestro robot, un grosor de 2mm sería suficiente. (Suñer, 2013)

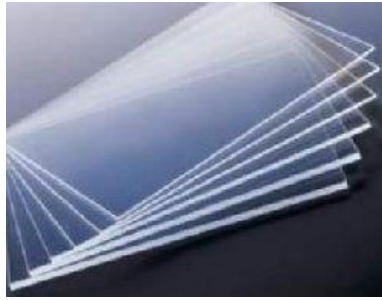


Figura 2-2: Metacrilato

Fuente: Suñer, Departamento Electrónica - CIPFP Luis. 2013. roboticasunyer. [En línea] 2013. [Citado el: 25 de Octubre de 2017.] <http://roboticasunyer.blogspot.com/>.

2.7.3 Duraluminio

Aleación de aluminio con variados porcentajes de cobre, magnesio, silicio y pequeñas trazas de hierro. Una composición típica es: cobre (0,45%-1,5%), magnesio 0,45%-1,5%), manganeso (0,6%-0,8%) y silicio (0,5%-0,8%). El duraluminio se caracteriza por tener excelentes propiedades mecánicas después de algunos días de reposo una vez templado a unos 500 °C. Tiene gran aplicación en construcciones aeronáuticas por su gran ligereza unida a elevada resistencia. (Full Mecánica, 2016)



Figura 3-2: Planchas de duraluminio

Fuente: <http://www.fullmecanica.com/definiciones/d/350-duraluminio.>

2.7.4 Material impresoras 3D

ABS (acrilonitrato butadieno estireno): es un plástico muy tenaz, duro y rígido. Aguanta altas temperaturas y es fácil pintar sobre él. Es muy resistente y presenta una cierta flexibilidad. La impresión con este material necesita de una cama caliente o base de impresión caliente donde se deposita la pieza, para conseguir la estabilidad necesaria. Se pueden obtener bobinas de filamento a partir de los restos de impresión, pero ojo durante la impresión se debe tener una buena ventilación ya que genera gases nocivos. No es biodegradable. Este material es capaz de soportar altas temperaturas.

PLA (poliácido láctico): es un material que se obtiene a partir de materiales naturales como el almidón del maíz o la caña de azúcar. Es biodegradable y no emite gases tóxicos durante la impresión. No necesita base caliente. No resiste temperaturas tan altas como el ABS, a partir de los 60°C empieza a descomponerse.

Laybrick: es una mezcla de varios materiales plásticos y yeso. A partir de él se obtienen piezas con aspecto de piedra arenisca. Se puede pintar y lijar fácilmente.

Laywoo-D3: formado por un polímero y un 40% de polvo de madera. Se obtienen piezas con cierto parecido a la madera. Las piezas obtenidas se pueden lijar, serrar y pintar.

Filaflex: es un filamento elástico con una base de poliuretano y otros aditivos que le confieren una gran elasticidad. La impresión con este material es lenta. Se utiliza para imprimir zapatillas, prótesis, carcasas para teléfonos móviles, etc. (Area Tecnología, 2017)

2.8 Métodos de fabricación de exoesqueletos

2.8.1 Maquinado

Dentro de la industria de manufactura, el maquinado es uno de los procesos más importantes a realizar. Este se basa en remover por medio de una herramienta de corte todo el exceso del material, de tal forma que la pieza terminada sea realmente la deseada. El proceso de maquinado incluye la deformación cortante del material, creando una viruta, cuando esta es removida, queda totalmente expuesta a una nueva superficie. (2016)

El mecanizado: se hace mediante una máquina herramienta, manual, semiautomática o automática, pero el esfuerzo de mecanizado es realizado por un equipo mecánico, con los motores y mecanismos necesarios. Las máquinas herramientas de mecanizado clásicas son:

- Taladro: La pieza es fijada sobre la mesa del taladro, la herramienta, llamada broca, realiza el movimiento de corte giratorio y de avance lineal, realizando el mecanizado de un agujero o taladro teóricamente del mismo diámetro que la broca y de la profundidad deseada.
- Limadora: esta máquina herramienta realiza el mecanizado con una cuchilla montada sobre el portaherramientas del carnero, que realiza un movimiento lineal de corte, sobre una pieza fijada la mesa, que tiene el movimiento de avance perpendicular al movimiento de corte.

- Mortajadora: Máquina que arranca material linealmente del interior de un agujero. El movimiento de corte lo efectúa la herramienta y el de avance la mesa donde se monta la pieza a mecanizar.
- Cepilladora: De mayor tamaño que la limadora, tiene una mesa deslizante sobre la que se fija la pieza y que realiza el movimiento de corte deslizándose longitudinalmente, la cuchilla montada sobre un puente sobre la mesa se desplaza transversalmente en el movimiento de avance.
- Brochadora: Máquina en la que el movimiento de corte lo realiza una herramienta brocha de múltiples filos progresivos que van arrancando material de la pieza con un movimiento lineal.
- Torno: Es la máquina herramienta de mecanizado más difundida, éstas son en la industria las de uso más general, la pieza se fija en el plato del torno, que realiza el movimiento de corte girando sobre su eje, la cuchilla realiza el movimiento de avance eliminando el material en los sitios precisos.
- Fresadora: En la fresadora el movimiento de corte lo tiene la herramienta; que se denomina fresa, girando sobre su eje, el movimiento de avance lo tiene la pieza, fijada sobre la mesa de la fresadora que realiza este movimiento. Es junto al torno la máquina herramienta más universal y versátil.
- Desde hace ya tiempo, la informática aplicada a la automatización industrial ha hecho que la máquina-herramienta evolucione hacia el control numérico. Así pues, hablamos de centros de mecanizado de 5 ejes y tornos multi-función, que permiten obtener una pieza compleja, totalmente terminada, partiendo de un tocho o de una barra de metal y todo ello en un único amarre. Estas máquinas con control numérico ofrecen versatilidad, altas capacidades de producción y preparación, ofreciendo altísima precisión del orden de micras. (2016)



Figura 4-2: Maquinado de una pieza

Fuente: <http://www.aceroslevinson.com/2016/11/que-es-el-máquinado/>.

2.8.2 Impresora 3D

Es una máquina capaz de imprimir figuras con volumen a partir de un diseño hecho por ordenador. Con volumen quiere decir que tiene ancho, largo y alto. Una impresora 3D lo que realmente hace es producir un diseño 3D creado con el ordenador en un modelo 3D físico (real). Es decir, si hemos diseñado en nuestro ordenador, por ejemplo, una simple taza de café por medio de cualquier programa CAD (Diseño Asistido por Computador), podremos imprimirla en la realidad por medio de la impresora 3D y obtener un producto físico que sería la propia taza de café. El término impresora como su nombre indica hace referencia a ese objeto que siempre hemos tenido en casa o en la oficina de nuestro trabajo y que, conectado a nuestros ordenadores, es capaz de producir documentos almacenados en nuestros ordenadores, fundamentalmente documentos de texto y/o documentos gráficos (en color o en blanco y negro). Con esto podemos conseguir pasar documentos electrónicos a documentos físicos. Pero las impresoras 3D dan un salto más allá y son capaces de imprimir y crear objetos completos.



Figura 5-2: Impresora 3D

Fuente: <http://www.areatecnologia.com/informatica/impresoras-3d.html>

2.9 Modelación y programación CNC

CAD/CAM será la teoría principal que se usará para mecanizar los componentes del exoesqueleto como son los eslabones, articulaciones y ejes.

2.9.1 CAD/CAM

En la actualidad los sistemas de diseño asistido por computadora/fabricación asistido por computadora (CAD/CAM por sus siglas en inglés) son disciplinas que estudian a los sistemas informáticos como herramientas de soporte en todos los procesos involucrados en el diseño y fabricación de cualquier tipo de producto, estos sistemas nos permiten conocer de manera anticipada como el comportamiento, las limitantes y la apariencia real que tendrán nuestros diseños al aplicar en el mundo real.

Los sistemas CAD/CAM además brindan ayuda al momento de diseñar cualquier producto que tenga en mente, precisamente por medio de la simulación por computadora podemos optar el tipo de material adecuado, el tipo de pieza y el tamaño apto para un mejor desempeño.

A continuación, describiremos los parámetros más importantes para describir este sistema de fabricación.

2.9.2 Control numérico computarizado CNC

El sistema numérico o control decimal numérico (CN) es la programación automatizada de máquinas herramientas, operadas a través de programas en un medio de almacenamiento, similar al mando manual mediante volantes y palancas. (Valnicrom, 2018)

El control numérico computarizado (CNC) ha ampliado considerablemente las aplicaciones de las máquinas industriales, mediante la realización de movimientos imposibles de efectuar manualmente, como círculos, líneas diagonales, etc. Generando piezas con perfiles sumamente complejas y optimizando diversas variables de procesos de manufactura como: precisión, seguridad, rapidez, repetitividad y reducción de desechos. (CONALEP, 2018)

En resumen, el sistema de control numérico se puede deducir que es sistema que aplicado a una máquina-herramienta automatiza y controla todas las acciones de esta, entre las que se encuentran:

- El valor y el sentido de las velocidades de avance y de corte.
- Los movimientos de los carros y de cabezal.
- Los cambios de herramientas y de piezas a mecanizar.
- Las condiciones de funcionamiento de la máquina que son los bloqueos, refrigerantes, lubricación.
- El estado de funcionamiento de la máquina (averías, funcionamiento defectuoso, etc.)
- La coordinación y el control de las propias acciones del CN como flujos de información, sintaxis de programación, diagnóstico de su funcionamiento, comunicación con otros dispositivos.

2.9.3 Ventajas de un sistema CNC

Se presentan algunas ventajas de la aplicación del sistema CNC:

- Mejora de la precisión y mejor calidad de productos.
- Mayor seguridad.
- Alta precisión del proceso.
- Reducción de residuos.
- Reduce la fatiga del operador, brindando mayor seguridad al mismo.

- Ejecución de procesos complejos. ()

2.9.4 *Desventajas de un sistema CNC*

- Una máquina controlada numéricamente no realizara cortes de metal tan rápido, como las máquinas convencionales.
- Es esencial la utilización de herramientas caras, elevando los gastos iniciales.
- Es necesario programadores y personal con experiencia.
- Los errores no son eliminados, aunque se utilice un control numérico, puesto que los operadores aún pueden cometer errores como, por ejemplo: error al pulsar un botón, alineaciones erradas, etc.

2.9.5 *Controladores CNC*

Generalmente el módulo de control CNC de los ejes de una máquina herramienta está compuesto por tres niveles de jerarquía: (1) el servo-control; (2) el interpolador que se encarga de coordinar los movimientos de los diferentes ejes de la máquina herramienta y el (3) control adaptativo.

Utiliza un código estándar en el que se varían diferentes parámetros de un bloque predefinido. En geometrías complejas existen diferentes interfaces que pueden generar de manera automática este tipo de código.

En la actualidad se presentan una serie de Controladores CNC, los cuales son representados por distintas firmas que lideran, bajo especificaciones técnicas sus propios controladores, entre las principales se pueden citar las siguientes:

FANUC, SIMUMERIK, MITSUBISHI, GSK, HNC, KND, WA, SKY, HAAS, GREAT, RENHE, FAGOR, DASEN.

2.9.6 Máquinas que usan el sistema CNC

Existen máquinas que usan el sistema CNC y cada máquina cumple un trabajo específico con procesos diferentes las cuales son las usadas para el mecanizado del exoesqueleto que se detallaran a continuación:

- *Máquinas fresadoras CNC.* Las fresadoras CNC usan un cortador rotatorio para realizar el corte, y un movimiento lineal para la alimentación. El material puede ser empujado en el cortador, o viceversa mediante caminos rectos o curvos tridimensionales, produciendo así el elemento establecido. La pieza terminada es creada mediante remoción de material innecesario desde la pieza de trabajo, lo que se conoce como fresado.
- *Tornos CNC.* El movimiento de corte se produce al rotar la pieza en contra de un único punto de herramienta. Esta herramienta se alimentará a lo largo o en la pieza de trabajo para producir el movimiento de alimentación. El maquinado de una pieza en un torno se denomina giro.
- *Centros de maquinado CNC.* Los centros de maquinado son máquinas CNC, poseen una avanzada tecnología combinando a la vez el fresado y torneado.

2.9.7 Herramientas de una máquina CNC

Estas herramientas son de vital importancia en una máquina CNC porque de ellas dependen de que estas generen una geometría distinta en el material a mecanizar y dar forma a las piezas del exoesqueleto entre las más importantes están las siguientes herramientas:

Tabla 2-2: Herramientas de una máquina CNC

Herramientas para Taladrar.	Herramientas para Tornear.
	



Fuente: Industry, Direct. Direct Industry. [En línea] [Citado el: 21 de Noviembre de 2017.] <http://www.directindustry.es/>.

2.9.8 Tipos de fresadoras CNC

El tipo de fresadoras se analiza por el número de ejes y se describe a continuación.

2.9.8.1 De 3 ejes

Se trata de fresadoras con posibilidad de movimiento horizontal, vertical y oblicuo, este último, como resultado de la combinación de movimientos entre mesa, ménsula y husillo.

2.9.8.2 De 4 ejes

Las fresadoras tipo cuatro ejes, cumplen todas las funciones descritas en el tipo anterior: movimiento relativo entre pieza y herramienta, en los tres ejes con un giro para la pieza de mecanizado.

2.9.8.3 De 5 ejes

Además de cumplir con todas las posibilidades de las descritas anteriormente; las fresadoras de cinco ejes cuentan con dos particularidades. De una parte, permitir el control de giro de la pieza sobre dos de sus ejes. Uno de ellos perpendicular al husillo y el otro, paralelo (como en el caso de las de cuatro ejes, que se consigue por medio de un plato giratorio o mecanismo divisor). De otra, permitir el giro de la pieza sobre un eje horizontal y que la herramienta pueda inclinarse alrededor de un eje, perpendicular al anterior. Este tipo de máquinas multi-ejes permiten trabajos donde el diseño es mucho más complejo. La utilización de las diferentes máquinas CNC deben ser acorde a la industria donde estén insertadas dependiendo al rango de tolerancias durante el diseño.

2.9.9 Parámetros de corte

2.9.9.1 Fresado en concordancia

La herramienta gira en el mismo sentido en el que avanza la pieza. Este tipo de fresado es también conocido como fresado hacia abajo debido a que, cuando el eje de giro de la fresa es horizontal, la componente vertical de la fuerza de corte está dirigida hacia la abajo.

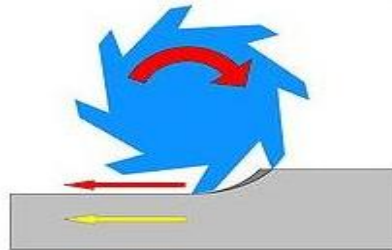


Figura 6-2: Fresado en concordancia o hacia abajo

Fuente: Bavaresco, Guillermo. 2017. Gabp Ingeniería. [En línea] 2017. [Citado el: 21 de Noviembre de 2017.] <https://gabpingeneria.weebly.com/uploads/2/0/1/6/20162823/pffresadora.pdf>.

2.9.9.2 Fresado en oposición

Conocido como fresado hacia arriba, en este caso ocurre lo contrario, es decir, la herramienta gira en sentido contrario al avance de la pieza y la componente vertical de la fuerza de corte se dirige hacia arriba.

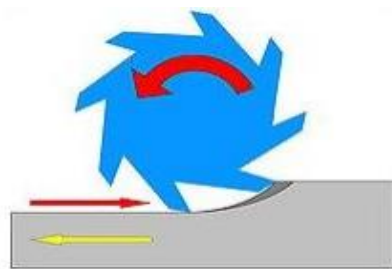


Figura 7-2: Fresado en oposición o hacia arriba.

Fuente: Bavaresco, Guillermo. 2017. Gabp Ingeniería. [En línea] 2017. [Citado el: 21 de Noviembre de 2017.] <https://gabpingeneria.weebly.com/uploads/2/0/1/6/20162823/pffresadora.pdf>.

Para obtener una buena calidad en la superficie mecanizada, el fresado en concordancia es el método de fresado más recomendable siempre que la máquina, la herramienta y los utillajes lo permitan. (Bavaresco, 2017)

2.9.9.3 Velocidad de corte

Se denomina a la distancia recorrida por fijo de un diente de fresa en m/s o ft/min.

$$V_c = \frac{\pi * D * N}{1000} (m/min)$$

Ecuación 1-2: Velocidad de corte

Donde, D: Diámetro de la fresa (mm), N: RPM de la fresa.

La velocidad es un dato que esta dado en tablas, por ellos no se calcula, pero lo que si se debe calcular son las revoluciones por minuto a la cual debe girar la fresa para realizar el corte de material determinado.

$$N = \frac{V_c * 1000}{\pi * D} (RPM)$$

Ecuación 2-2: Velocidad del husillo

2.9.9.4 Avance o desplazamiento de la mesa

Viene dado en mm/min en sentido longitudinal, transversal o vertical, depende de: la fresa, material de la pieza, profundidad de corte (influye en el avance y viceversa), calidad de la superficie (tipo de acabado), potencia de máquina, sujeción de la pieza.

Procedemos a calcular de la siguiente manera:

1. Calculamos las RPM primero.
2. Posteriormente se calcula la potencia efectiva de la máquina (Pe). Esta potencia es igual al 70% la potencia teórica (P), debido al rozamiento, desplazamiento de poleas, etc. Las unidades para indicar la potencia es Kw (kilowatt).

$$P = \frac{V * I}{1000} (Kw)$$

Ecuación 3-2: Potencia teórica

$$P_e = \frac{P * 70}{100} (Kw)$$

Ecuación 4-2: Potencia efectiva

Donde, P: Potencia teórica en Kw, V: voltaje (V). I: Corriente en Amperios, P_e : Potencia efectiva en Kw.

2.9.9.5 El avance por minuto

Se calcula en función del avance por diente (Sz), el número de dientes de la fresa (z) y el número de revoluciones.

2.9.9.6 El avance por diente

Desplazamiento de la mesa por cada diente de fresa, su valor no deberá ser menor a 0.02 mm ni mayor a 0.2 mm. Este es elegido de acuerdo con la calidad de superficie, dureza del material trabajado, sujeción de la pieza, etc.

$$\frac{\text{Avance}}{\text{minuto}} = S_z * Z * N$$

Ecuación 5-2: Velocidad de avance

Donde, S_z : Avance por diente, Z : Numero de dientes de la fresa.

2.9.9.7 Volumen máximo (V_m):

Es la cantidad máximo de viruta en cm^3 por Kw de potencia que puede desprender la máquina en un minuto.

$$V_m = V_a * P_e (cm^3/kw)$$

Ecuación 6-2: Volumen máximo de viruta

Donde, V_a : Volumen admisible, P_e : Potencia efectiva en Kw.

Se muestra a continuación las tablas del volumen admisible, es decir el valor de V_a en cm^3 por Kw/min para fresas frontales hasta 20% .

Tabla 3-2: Volumen permisible de viruta

MATERIAL	MATERIAL ADMISIBLE
Acero	12-15
Acero	10-14
Acero	9-12
Acero	6-8
Fundición gris	15-20
Latón	28-40
Aluminio	40-70

Realizado por: Joel Lliguay;2018.

Fuente: Autor

Nota: Se debe explicar que el volumen admisible, es la cantidad de cm^3 , que puede desprenderse de la máquina por cada Kw de potencia en un minuto.

2.9.9.8 Profundidad de corte.

Es calculada a base de Vm y del avance por minuto (avance/minuto).

$$a = \frac{V_m * 1000}{b * A_{min}}$$

Ecuación 7-2: Profundidad de corte

Donde, A: Profundidad de corte, Vm: Volumen máximo en cm^3 Kw/min, b: Ancho de la fresa, Amin: Avance por minuto.

Nota: se ha de tomar el 80% de la profundidad dada por el cálculo, para poder dar la profundidad de corte en la máquina. (Vasco, 2017)

2.9.10 Programación de la máquina CNC.

2.9.10.1 Planificación del Programa.

- *Lectura de Planos*

Esta es una habilidad básica dentro de la industria de manufacturación, y absolutamente todo el equipo de trabajo como: ingenieros, gerentes, programadores, operadores de CNC, deberán conocer.

- *Selección de la máquina idónea*

Para realizar una correcta selección se deberá tener en cuenta los siguientes requisitos: el área de trabajo de cada máquina, las opciones de cada máquina (fresado, taladrado, etc), herramientas de corte, velocidades de giro, tasas de alimentación, montaje de fijaciones, operaciones de la máquina: ajustes, arranque, instalación y ejecución de programas.

- *Hoja de operaciones*

Se utiliza para describir o aclarar diversos procesos para el maquinado de una pieza en la máquina CNC.

El proceso deberá ser escrito en secuencia del mecanizado, esto incluirá la herramienta a utilizarse y obviamente los datos de corte.

Requerimientos de herramientas: los requisitos y selección de herramientas estan basados en determinadas restricciones de piezas y en practicas de la industria manufacturera. Por ende los buenos programadores y operadores CNC deberan tener presente lo siguiente:

- Saber las características del material a ser máquinado.
- Bajar los costos utilizando un catalogo de herramientas industriales.
- La calidad de la fijacion deberá basarse en el numero de piezas que eventualmente seran producidas.
- Para una adecuada operación de la máquina, las herramientas a usarse deberan ser las idoneas para dicho proceso.
- Se debe tener almenos un respuesto de todos los tipos de herramientas, ya sea que se necesite hacer una reparacion o cambio.
- Utilizar herramientas de acero de alta velocidad en materiales de fácil máquinacion.
- Para materiales de corte difícil se deberan usar herramientas de carbono.
- Para evitar que la viruta ocacione problemas cuando se trabaje con el taladro, se deberan utilizar escariadores en lugar de brocas.
- Se debera tener en cuenta la flexion que ocurre al usar herramientas largas, ya que es muy probable que se necesite pasadas extras para eliminar rayas y virutas.

2.9.10.2 Planos de construcción

Los códigos para crear los planos de construcción serán G17(XY), G18(XZ), G19(YZ). Y la herramienta deberá moverse de forma paralela a uno de estos planos, por defecto se trabaja con el plano G17(XY).

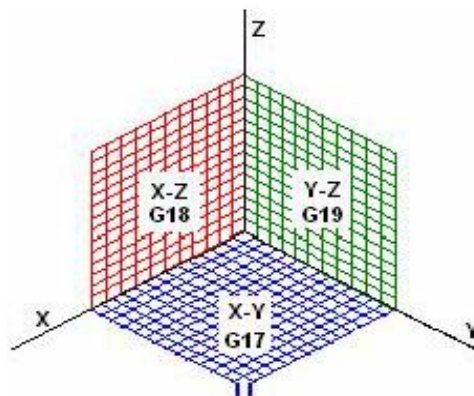


Figura 8-2: Planos de construcción CNC

Fuente: Autor

2.9.10.3 *Sistema de unidades y modos de entrada.*

Cuando hablamos de estos sistemas nos referimos a las unidades de medición que utiliza el programa CNC. Las máquinas en general entienden las unidades métricas (milímetros, mm) y las inglesas (pulgadas, plg). Por ende, se debe especificar las unidades que vayamos a utilizar, algunas máquinas vienen ajustadas de fábrica en pulgadas o milímetros, esto se ve al iniciar el programa con G70 que especifica pulgadas y G71 que especifica milímetros.

Los tipos de entrada se refieren al tipo de información coordenada que se ingresa al programa de la máquina CNC, existen dos tipos:

- Entrada absoluta, determinada para el código G90: especifica la distancia desde el origen o punto cero del programa, el modo absoluto es el mas comun.
- Entrada incremental, determinada para el código G91: utiliza un punto previo como origen para especificar la distancia y direcciones, generalmente la entrada incremental es denominada punto a punto.

2.9.10.4 *Principales códigos de programación.*

Tabla 4-2: Descripción del número de letras

N	Número de secuencia
G	Funciones preparatorias
X	Comando del eje X
Y	Comando del eje Y
Z	Comando del eje Z
R	Radio desde el centro especificado
A	Ángulo contra los punteros del reloj desde el vector +X
I	Desplazamiento del centro del arco del eje X
J	Desplazamiento del centro del arco del eje Y
K	Desplazamiento del centro del arco del eje Z
F	Tasa de alimentación
S	Velocidad de giro
M	Función miscelánea
T	Número de la herramienta

Realizado por: Joel Lliguay;2018.

Fuente: Autor

Número de secuencia: también conocido como número N, este número identifica el bloque o línea en un programa CNC. La palabra de código común utilizada comienza con N. Entonces N será el primer código de un bloque cuyo rango usualmente va desde N1 hasta N9999. Diversas CNC no requieren el uso de estos códigos por lo que esto ayuda a liberar la memoria.

Sus principales beneficios son la búsqueda rápida en programas largos y el hecho de hacer partir un programa en casi cualquier número de líneas. El programa por defecto saltará N número entre bloques permitiendo dejar espacios, en donde se puedan insertar bloques olvidados o adicionales.

Funciones preparatorias: Están bienen a ser los códigos G, estos están indicados por la letra G y un número de dos dígitos, estos dos códigos son las funciones más importantes en Programación CNC ya que dirigen el sistema CNC para el procesamiento de los datos de coordenadas en una materia particular.

Funciones misceláneas: El código M se usa para funciones misceláneas como por ejemplo el control del líquido enfriado, conexión y dirección del mandril, rebobinado, y fin del programa, estos códigos van desde M00 a M99, se designan por el constructor de la máquina.

Ciclos especiales: son aquellas secuencias preprogramadas con movimientos repetitivos de la herramienta, los cuales se hallan insertos en operaciones comunes tales como taladrado, golpe, amplio y emboltura, son usados con el fin de disminuir la cantidad de códigos de programas que normalmente se debería escribir, los ciclos grabados son códigos G que son opciones adquiridas con una CNC.

Códigos especiales: Son utilizados para realizar funciones en los controles de la CNC aumentando la capacidad de los programadores para escribir programas inteligentes, la mayoría de estos códigos son estándar en las CNC actuales, los demás pueden ser opcionales.

2.9.10.5 *Consideraciones de programación.*

- Crea un estilo de programación que pueda ser usado por todos los programadores en su instalación.
- Leer los programas en busca de errores tipográficos antes de enviarlos al taller.
- Obtener una programación sencilla, para realizar la función dada.
- Verificar los códigos modales y los no modales, los modales son códigos que se mantienen activos hasta que son cancelados por otro código para evitar repetirlos, línea tras línea, en tareas repetitivas tales como taladro, ampliación de un agujero, etc.
- Escoger la alimentación y velocidades adecuadas que signifiquen un balance entre la vida de la herramienta y los cortos ciclos de tiempo.
- Un ciclo de tiempo completamente optimizado puede pensarse como uno que produce el mayor número de piezas terminadas por día.

2.9.11 Parámetros del centro de mecanizado CNC Bridgeport VMC 800-22

El centro de mecanizado CNC Bridgeport nos ofrece las características que se manifiesta a continuación:

- Movimiento en los 3 ejes
- Portaherramientas amplios voladizos
- Sujeción de la pieza firme
- Altos avances y número de revoluciones.
- Panel de control.
- Carrusel de 22 porta herramientas.
- Lubricación y refrigeración automática.
- Sistema neumático para la sujeción de los conos.
- Entrada RS 232 para transferencia de datos.
- Entrada de voltaje de 220V
- Distancia máxima de mecanizado X=2000 mm, Y= 500mm, Z=700 mm



Figura 9-2: Centro de mecanizado CNC
Bridgeport VMC 800-22

Fuente: Autor

El centro de mecanizado consta con sus manuales de instalación, control de la máquina y del panel para ser configurada de acuerdo con las indicaciones para un correcto funcionamiento de todos los sistemas y evitar paros por una mala utilización del centro de mecanizado, las herramientas y accesorios son originales de la máquina y poseen características técnicas para el correcto desempeño en el proceso de fabricación.

2.9.12 Parámetros del centro de mecanizado vertical Romi D 600

El centro de mecanizado vertical Romi D 600 fue diseñado para trabajar tanto en ambientes de alta producción como en matricerías. Tiene cambiador automático con capacidad para 20 herramientas y el motor principal es de 20 CV de potencia. Equipado con CNC Fanuc 0i-MC, posee interfaces de comunicación que proporcionan a los usuarios una gran flexibilidad para la carga de programas y parámetros. Se puede equipar con el software opcional “Kit plus”, que permite mejorar el rendimiento de la máquina en el mecanizado de piezas de perfil complejo (moldes y matrices). (2018). Se mencionan las siguientes características:

- Cono del husillo ISO 40
- Velocidad del cabezal = 7 a 7.500 rpm ó 10 a 10.000 rpm
- Avances rápidos (X / Y / Z) = 30 m / min
- Recorrido de la mesa (eje X) = 600 mm
- Recorrido transversal de la mesa (eje Y) = 530 mm
- Recorrido del cabezal (eje Z) = 580 mm
- Número de herramientas = 20
- CA = Motor principal 20 CV / 15 kW.
- Entrada de voltaje de 220V



Figura 10-2: Centro de mecanizado vertical Romi D 600

Fuente: Autor

CAPÍTULO III

3. DISEÑO PARA LA MANUFACTURA Y ENSAMBLE

El diseño para la manufactura y ensamble (también conocido como DFMA - design for manufacturing and assembly), es un enfoque de la Ingeniería Concurrente orientado hacia la fabricación y montaje. Consiste en un conjunto de técnicas y metodologías para la mejora del diseño (o rediseño) de un producto que, respetando sus funciones esenciales, tiene por objetivo mejorar los aspectos de fabricabilidad, montabilidad y costes. (Fundación Pro dintec)

En este capítulo se implementó una parte de la metodología del Diseño para la Fabricación y Ensamble (DFMA) para el proceso de manufactura del exoesqueleto para rehabilitación física en miembros inferiores buscando obtener los criterios y los parámetros que ayudan de una manera efectiva para realizar el rediseño del exoesqueleto estudiado anteriormente, el material seleccionado usando un concepto más cercano a las características que se requiere en este proyecto al igual que el costo de manufactura.

3.1 Definición de ingeniería concurrente

La Ingeniería Concurrente es una nueva forma de concebir la ingeniería de diseño y desarrollo de productos y servicios de forma global e integrada en donde concurren las siguientes perspectivas:

3.1.1 Desde el punto de vista del producto

Se toman en consideración tanto la gama que se fabrica y ofrece a la empresa como los requerimientos de las distintas etapas del ciclo de vida y los costes o recursos asociados.

3.1.2 Desde el punto de vista de los recursos humanos y las metodologías

Colaboran profesionales que actúan de forma colectiva en tareas de asesoramiento y de decisión (con presencia de las voces significativas) o de forma individual en tareas de impulsión y gestión (gestor de proyecto), tanto si pertenecen a la empresa como si son externos a ella (otras empresas, universidades o centros tecnológicos).

3.1.3 Desde el punto de vista de los recursos materiales

Concurren nuevas herramientas basadas en tecnologías de la información y la comunicación sobre una base de datos y de conocimientos cada vez más integrada (modelización 3D, herramientas de simulación y cálculo, prototipos y útiles rápidos, comunicación interior, Internet).

Para designar este nuevo concepto, además del término “ingeniería concurrente”, en la literatura especializada aparecen otras denominaciones como Ingeniería Simultánea, Diseño Total o Diseño Integrado* (Fundación Prodimtec)

3.2 Estudio de alternativas

Anteriormente el grupo de investigación realizó un estudio de alternativas de un exoesqueleto para rehabilitación física de miembros inferiores en el cual satisface las condiciones esperadas en dicho estudio, pero para este nuevo proyecto no cumple los requerimientos deseados ya que se necesita realizar más estudios pertinentes.

El estudio de alternativas en este proyecto es necesario para obtener los criterios y parámetros importantes que de manera efectiva sirven para realizar el diseño y se decide realizar dicho estudio para la grúa móvil de rehabilitación y el mecanismo de cadera regulable del exoesqueleto, evitando así la pérdida de material y tiempos, y se usa la metodología QFD (Quality Function Deployment).

La matriz QFD o más conocida como casa de la calidad es una herramienta muy importante en el diseño de productos y servicios, en este caso se implementará en el proyecto actual para que cumpla con los objetivos planteados para el exoesqueleto. Para ellos se recoge la voz del cliente (usuario) y del ingeniero para interpretar las demandas y expectativas que existen en el mercado.

Es importante tomar en cuenta dos parámetros importantes que son los requerimientos y especificaciones para la matriz QFD.

3.2.1 Requerimientos

Los requerimientos son las necesidades a las que el producto se debe ajustar y adaptarlos en base al resultado de la investigación previa y del estado del arte de los exoesqueletos actuales en donde debe cumplir lo que el producto debe hacer y no cómo debe hacer, teniendo en cuenta que siempre debe estar formulada en forma positiva y no negativa.

3.2.2 Especificaciones

Las especificaciones de un producto se expresan en forma precisa y medible, dejando claro lo que el producto debe realizar, en donde estas constituyen una traducción técnica de los requerimientos del cliente.

3.3 Análisis de las especificaciones para el mecanismo de cadera regulable

Para el mecanismo de cadera regulable es necesario realizar este análisis ya que anteriormente hubo un estudio de una cadera móvil y en este caso no satisface las necesidades del exoesqueleto a fabricar por eso se pretende contar con todos los requerimientos y especificaciones para que el mecanismo cumpla el desempeño esperado.

3.3.1 Voz del usuario(cliente) para el mecanismo de cadera regulable

La voz del usuario toma en cuenta todos los requerimientos del cliente para determinar las particularidades que deberá tener el producto terminado, en este caso se analizó 5 requerimientos importantes que son:

- A. Requerimientos económicos.
- B. Requerimientos funcionales.
- C. Requerimientos espaciales.
- D. Requerimientos de apariencia.
- E. Requerimientos de conservación.

Se toma en cuenta la clasificación antes mostrada, y los requerimientos quedan de la siguiente manera:

- A. Requerimientos económicos.
 - Mecanismo de cadera económico.
 - Mecanismo de fácil mantenimiento.
- B. Requerimientos funcionales.
 - Mecanismo de fácil manipulación.
 - Mecanismo liviano (fácil transporte).

- Mecanismo de cadera regulable (capaz de adaptarse a diferentes tamaños de cadera).
- Mecanismo de accionamiento manual.

C. Requerimientos espaciales.

- Mecanismo de cadera desmontable.
- Mecanismo capaz de soportar el peso, de los componentes y actuadores que conforman el exoesqueleto.
- Mecanismo de cadera de fácil ensamble, al soporte estructural.

D. Requerimientos de apariencia.

- Mecanismo de estética agradable al usuario (cómodo y seguro).
- Mecanismo que no lastime al paciente.

E. Requerimientos de conservación.

- Mecanismo resistente a la corrosión del ambiente.
- Mecanismo de larga vida útil.

3.3.2 Voz del ingeniero para el mecanismo de cadera regulable

La voz del ingeniero encarga de convertir técnicamente los requerimientos de la voz de usuario, y se ha obtenido 4 características importantes para analizar el mecanismo de cadera regulable que son:

- A. Características económicas.
- B. Características de confort.
- C. Características de mecánicas.
- D. Características de duración.

Se toma en cuenta la clasificación antes mostrada, y las características quedan de la siguiente manera:

- A. Características económicas.
 - Costos.

- Mantenimiento.

B. Características de confort.

- Niveles de ruido.
- Ergonómico.
- Mecanismo de cadera seguro.

C. Características de mecánicas.

- Dimensiones.
- Regulación.
- Material de construcción.
- Precisión.
- Peso.
- Soporte de cargas.

D. Características de duración.

- Tiempo de vida útil.
- Resistencia a la corrosión.

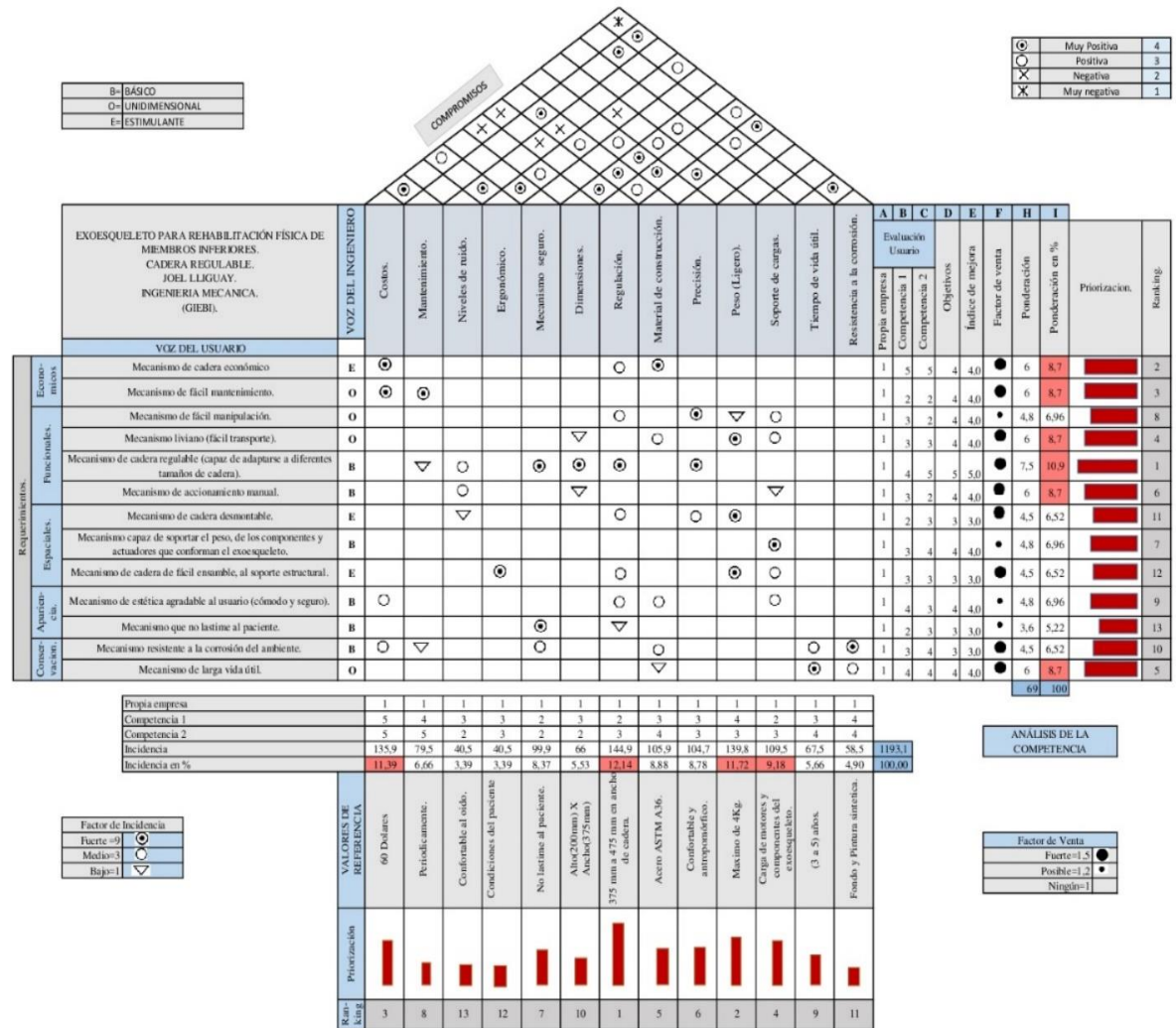
Resultados de la matriz de calidad

La matriz QFD que se muestra en la tabla 1-3 fue analizada y elaborada en base a las sugerencias de Carles Riba Romeva para el diseño concurrente.

Según (Riba Romeva, 2002) y se toma en cuenta que para la columna A se analiza el desempeño del actual producto en la empresa, se calificó con el número 1 en todos los parámetros porque no se cuenta con ningún producto previamente elaborado.

En las columnas B y C se examina el producto de otras empresas que se enfocan en la fabricación de exoesqueletos orientados a la rehabilitación teniendo en cuenta que se analiza con los mismos parámetros ya propuestos.

Tabla 1-3: Desarrollo de la matriz QFD del mecanismo de cadera regulable



Realizado por: Joel Lliguay 2018
Fuente: Autor

Conclusiones obtenidas de la matriz QFD

Este punto es el más importante por que muestra el resultado de los requerimientos técnicos más significativos para la construcción del mecanismo de cadera y se menciona a continuación:

- Regulación.
- Peso (ligero).
- Costos.
- Soporte de cargas.

Entonces en conclusión se puede decir que los requerimientos técnicos mencionados para el mecanismo de cadera, debe ser regulable a cualquier tipo de silueta humana en especial la cadera y también a la grúa de rehabilitación, a la vez que soportara las cargas de los eslabones y motores que conforman el exoesqueleto, siendo esta característica el requerimiento de más importancia en la casa de la calidad.

3.4 Análisis funcional para el mecanismo de cadera

Para el diagrama funcional a ser analizado se tendrá tres tipos de entradas y salidas designadas para el material, energía y control. Las entradas están de acuerdo en base a la función que se requiera en la máquina.

Se deduce que para este análisis funcional del mecanismo de cadera es de nivel 1. De los requerimientos deducidos anteriormente, se pudieron determinar las entradas y salidas del sistema, encontrando de esta manera diferentes soluciones las cuales son el complemento para el sistema que compone el mecanismo de cadera regulable.

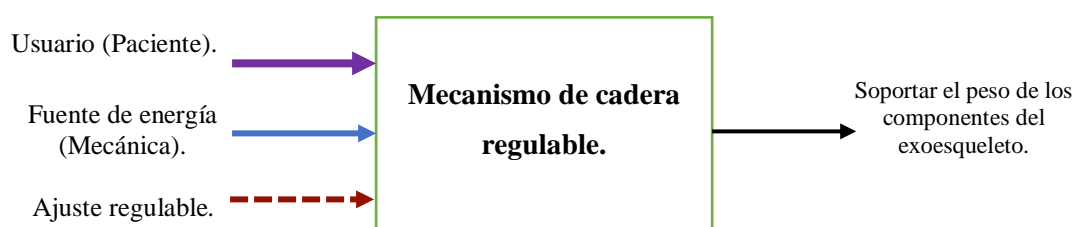


Figura 1-3: Función primaria del mecanismo de cadera regulable.

Realizado por: Joel Lliguay 2018

En el primer nivel del análisis funcional las señales que ingresan son: el usuario o paciente que son considerados como material, la señal de energía en este caso es de forma mecánica y la señal de control en este caso sería el ajuste regulable. Una vez analizado el primer nivel da prioridad a un análisis de funciones secundarias que es el nivel 2 y este detallan las funciones que se requieren para alcanzar el nivel 1 para el funcionamiento esperado para este mecanismo.

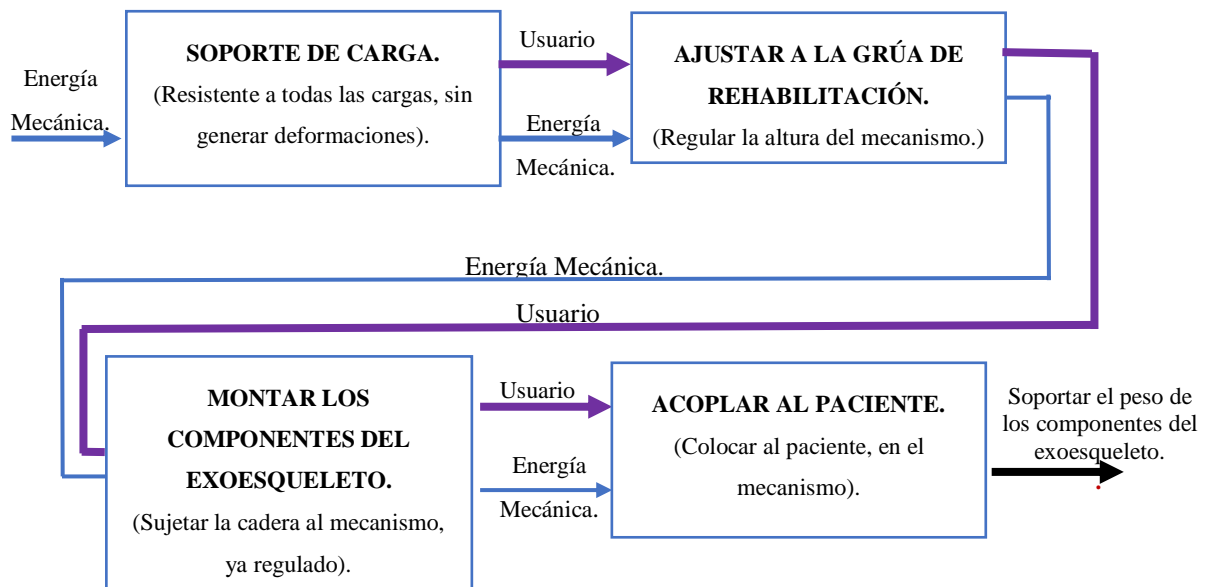


Figura 2-3: Diagrama de las funciones secundarias del mecanismo de cadera regulable

Realizado por: Joel Lliguay 2018

3.4.1 Definición de los módulos

Es necesario realizar la definición de módulos porque este divide el producto en varios bloques funcionales para determinar si existe la posibilidad de optimizar o disminuir costos y tiempos.

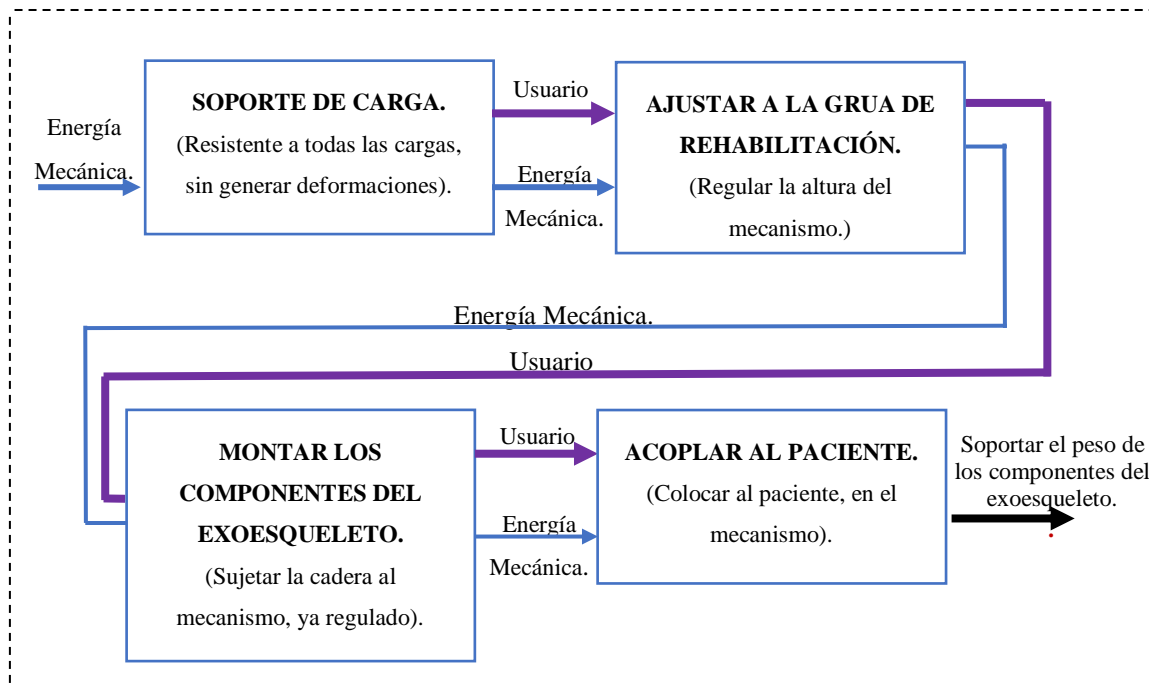


Figura 3-3: Diagrama de las funciones secundarias del mecanismo de cadera regulable

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Las funciones permiten que el proceso se de en un solo módulo cumpliendo un conjunto de actividades desde el soporte de cargas hasta acoplar al paciente dando así el resultado esperado.

3.4.2 Alternativas de solución

En la evaluación del diseño para el mecanismo de cadera regulable, el módulo cumple con las siguientes funciones:

- Soporte de cargas.
- Ajuste a la grúa de rehabilitación.
- Montar los componentes del exoesqueleto.
- Acople al paciente.

Para estas 4 posibles funciones se describe cada función del módulo para encontrar la mejor alternativa esperada.

3.4.2.1 Soporte de cargas

En esta función el mecanismo de cadera regulable debe ser capaz de soportar el peso de los componentes que conforman la estructura del exoesqueleto y cuando este en la rehabilitación también el peso del paciente en cierto modo, sin generar deformaciones sobre el mismo.

- Ventajas. Capaz de soportar pesos de hasta 100 kg, dando seguridad de montar los componentes como son los eslabones, actuadores etc.
- Desventajas. Este no tiene soportes para alojar los motores de la rodilla y tobillo y las cargas que estas generan no dan estabilidad al exoesqueleto.

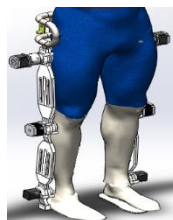


Figura 4-3: Soporte de cargas de los componentes y del paciente

Fuente: Autor

3.4.2.2 Ajuste a la grúa de rehabilitación móvil

El mecanismo se puede ensamblar y deslizar sobre la grúa de rehabilitación sin dificultad, dependiendo de los requerimientos del paciente.

- Ventajas. Fácil montaje y desmontaje de este mecanismo, cuenta con la característica de posicionarse acorde a la estatura del paciente.
- Desventajas. Se necesita precisión y fuerza para colocar el mecanismo en su lugar de trabajo.

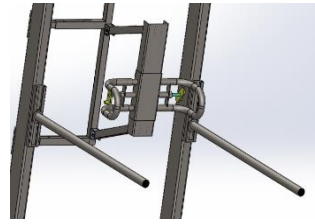


Figura 5-3: Ajuate a la grúa de rehabilitación móvil.

Fuente: Autor

3.4.2.3 Montar los componentes del exoesqueleto

El diseño de la estructura permite montar los componentes que conforman el exoesqueleto de una manera precisa y con estabilidad empezando desde la articulación de cadera.



Figura 6-3: Montar los componentes del exoesqueleto

Fuente: Autor

- Ventajas. Fácil montaje y desmontaje de los componentes que se ensamblan en él.
- Desventajas. No tiene mucha estabilidad de los componentes.

3.4.2.4 Acople al paciente

El mecanismo posee un sistema de regulación en base a un tornillo que permite adaptarse a la cadera de diversos pacientes.



Figura 7-3: Acople al paciente.

Fuente: Autor

- Ventajas. Es de fácil regulación y toma cualquier medida que se le imponga en el rango de 375 a 475 mm.

Desventajas.

- Es manual.
- Se necesita realizar manteniendo y lubricación en el tonillo de regulación periódicamente.

3.5 Alternativas del módulo

Para determinar una correcta alternativa de módulos, se debe comparar las ventajas y desventajas entre las 2 alternativas de solución que se muestran a continuación.

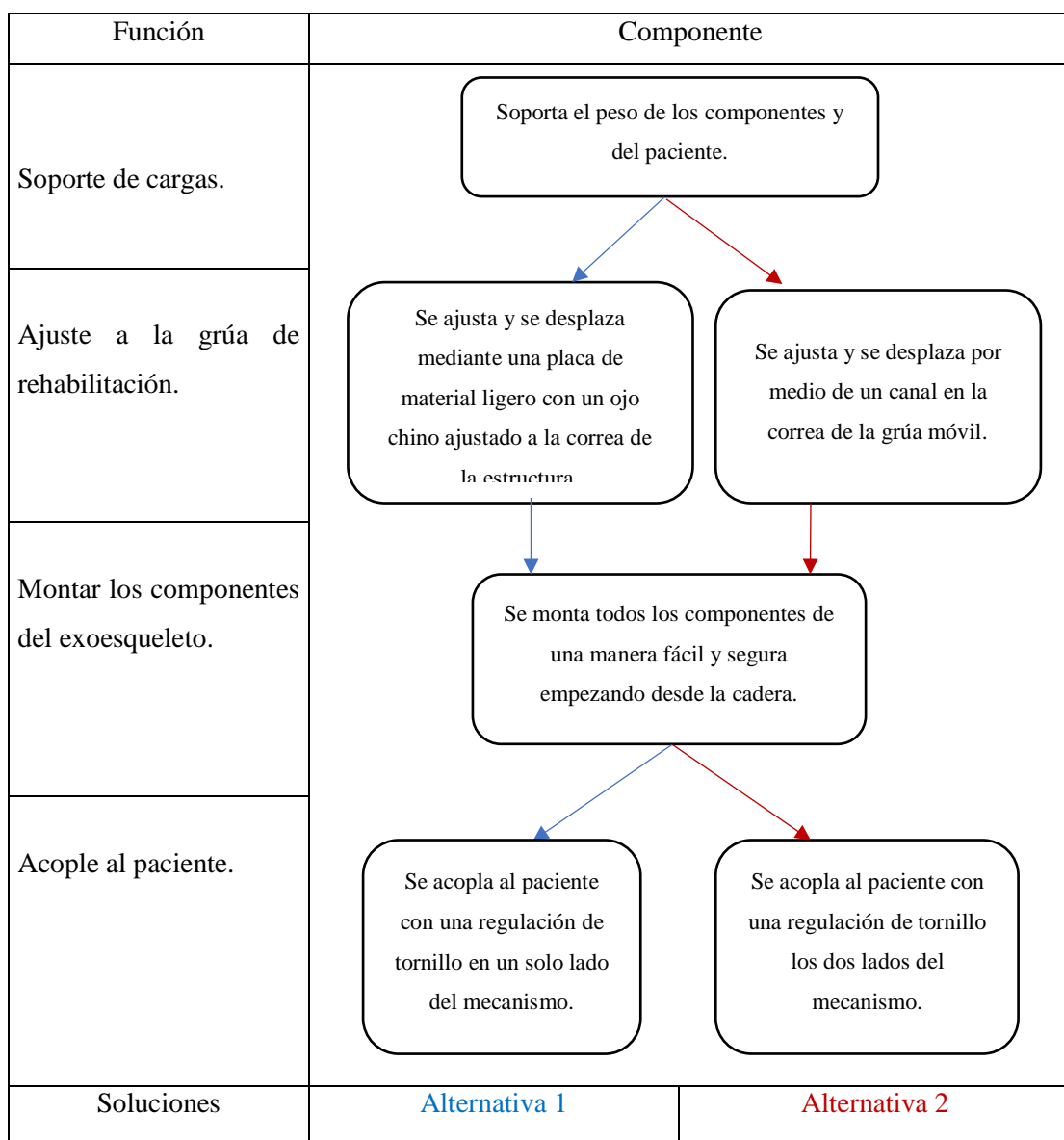


Figura 8-3: Posibles alternativas de solución del mecanismo de cadera

Realizado por: Joel Lliguay 2018

La primera alternativa del mecanismo mostrado en la figura 9-3, consiste en una placa con un agujero alargado en su parte central, elaborada de un material resistente y liviano, para no generar un sobrepeso, acoplados a los tubos doblados. Para la regulación, está un tornillo regulable, ubicado en el lado izquierdo, encargado de la regulación del ancho de la cadera.

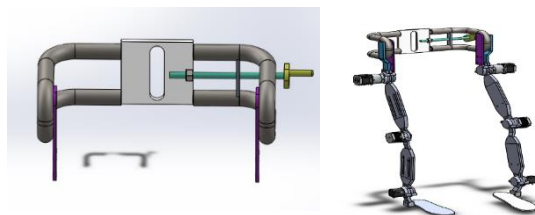


Figura 9-3: Primera alternativa del mecanismo de cadera regulable.

Fuente: Autor.

La segunda alternativa se muestra en la figura 10-3, esta estructura consiste en dos tornillos de regulación en ambos lados de la parte central, los cuales deberán ser roscados para generar el movimiento, consta de un canal que permitirá a este mecanismo acoplarse y desplazar a la estructura soporte.

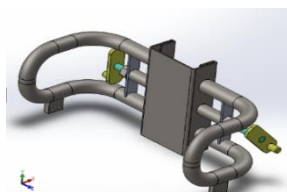


Figura 10-3: Segunda alternativa del mecanismo de cadera regulable.

Fuente: Autor

3.5.1 *Evaluación de soluciones*

Es necesario realizar una evaluación de las alternativas para la toma de decisiones convenientes en el diseño, estas evaluaciones deben ponderar distintos aspectos del sistema en base a criterios que a menudo implican juicios de valor. Para determinar una decisión deben estar presentes dos elementos importantes siguientes:

- *Alternativas.* Se deberá disponer como mínimo de dos alternativas con características diferentes.
- *Criterios.* Hay que establecer los criterios en base a la evaluación de alternativas, así como también la ponderación relativa entre ellas.

3.5.2 *Método ordinal corregido de criterios ponderados*

La manera de predecir la solución entre diversos criterios es conocer el orden de preferencia de evaluación.

Es recomendable el método ordinal corregido de criterios ponderados, porque permite obtener resultados sin necesidad de analizar los parámetros de cada propiedad y sin que estime numéricamente el peso de cada criterio. (Riba Romeva, 2002). El método sugerido usa tablas donde cada criterio se confronta con los restantes criterios (o soluciones), se evalúa con los valores de 1, 0.5 y 0 se describe a continuación de cada valor:

- Se asigna un valor de 1. Si el criterio (o solución) de las filas es superior (o mejor; >) que el de las columnas. (Riba Romeva, 2002).
- Se asigna un valor de 0,5. Si el criterio (o solución) de las filas es equivalente (=) al de las columnas. (Riba Romeva, 2002).
- Se asigna un valor de 0. Si el criterio (o solución) de las filas es inferior (o peor; <) que el de las columnas. (Riba Romeva, 2002).

3.5.3 Criterios de valoración del módulo

Para encontrar el módulo más conveniente, se emplea el método ordinal corregido de criterios ponderados. (Riba Romeva, 2002). Los criterios de valoración más determinantes se detallan a continuación:

- Regulación. El mecanismo deberá brindar comodidad al paciente al momento de ser colocado para su rehabilitación, evitando que se genere incomodidad o lesiones.
- Peso (ligero). El peso debe ser muy bajo para no generar una carga adicional por parte del mecanismo en la grúa de rehabilitación
- Costos. Al momento de su construcción la meta es de ser lo más económica posible.
- Soporte de cargas. Es de suma importancia que el mecanismo soporte las diferentes cargas que conforman el exoesqueleto.

Tabla 2-3: Criterios ponderados

Ponderación	Regulación	Peso (ligero)	Costos	Soporte de cargas	$\Sigma+1$	Ponderación
Regulación.		1	1	1	4	0,44
Peso (ligero).	0		0,5	0	1,5	0,17
Costos.	0	0,5		0	1,5	0,17
Soporte de cargas.	0	0,5	0,5		2	0,22
Suma					9	1

Realizado por: Joel Lliguay 2018
Fuente: Autor

Posteriormente se procede a realizar las respectivas soluciones con respecto a los criterios.

- Solución 1, representa a la primera alternativa de solución del mecanismo de cadera regulable.
- Solución 2, representa a la segunda alternativa de solución del mecanismo de cadera regulable.

Tabla 3-3: Evaluación de las soluciones (Regulación)

Regulación	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0,5	1,5	0,429
Solución 2	1		2	0,571
		Suma	3,5	1

Realizado por: Joel Lliguay 2018
Fuente: Autor

La evaluación resulta con Solución 1 < Solución 2.

Tabla 4-3: Evaluación de las soluciones (Peso (ligero))

Peso (ligero)	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0,5	1,5	0,429
Solución 2	1		2	0,571
		Suma	3,5	1

Realizado por: Joel Lliguay 2018
Fuente: Autor

La evaluación resulta con Solución 1 < Solución 2.

Tabla 5-3: Evaluación de las soluciones (Costos)

Costos	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0,5	1,5	0,429
Solución 2	1		2	0,571
		Suma	3,5	1

Realizado por: Joel Lliguay 2018
Fuente: Autor

La evaluación resulta con Solución 1 < Solución 2

Tabla 6-3: Evaluación de las soluciones (Soporte de cargas)

Soporte de cargas	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0,5	1,5	0,5
Solución 2	0,5		1,5	0,5
		Suma	3	1

Realizado por: Joel Lliguay 2018
Fuente: Autor

La evaluación resulta con Solución 1 = Solución 2

Tabla 7-3: Tabla de conclusiones

Conclusión	Regulación	Peso (ligero)	Costos	Soporte de cargas.	Σ	Prioridad
Solución 1	0,44x0,429	0,17x0,429	0,17x0,429	0,22x0,5	0,45	2
Solución 2	0,44x0,571	0,17x0,571	0,17x0,571	0,22x0,5	0,55	1

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

El mecanismo de cadera que más se ajusta a los criterios de evaluación es la solución 2.

3.6 Análisis de las especificaciones de la grúa de rehabilitación móvil

Para el estudio de la grúa de rehabilitación móvil es necesario realizar este análisis con el fin que la estructura realice la rehabilitación física para miembros inferiores en forma estática, es decir que el exoesqueleto simulara los movimientos de rehabilitación juntamente con el paciente sin que exoesqueleto se desplace con el usuario, a su vez manteniendo una posición fija con respecto del suelo para que así logre los movimientos estudiados de la marcha libremente y antes de fabricar se pretende contar con todos los requerimientos y especificaciones para que cumpla el desempeño esperado.

3.6.1 Voz del usuario (cliente) grúa de rehabilitación móvil

La voz del usuario toma en cuenta todos los requerimientos del cliente para determinar las particularidades que deberá tener el producto terminado, en este caso se analizó 5 requerimientos importantes que son:

- A. Requerimientos económicos.
- B. Requerimientos funcionales.
- C. Requerimientos espaciales.
- D. Requerimientos de apariencia.
- E. Requerimientos de conservación.

Se toma en cuenta la clasificación antes mostrada, y los requerimientos quedan de la siguiente manera:

- A. Requerimientos económicos.
- Grúa de rehabilitación económica.

- Grúa de rehabilitación de fácil mantenimiento.

B. Requerimientos funcionales.

- Grúa de rehabilitación de fácil desplazamiento al caminar con el paciente.
- Grúa de rehabilitación ligera (fácil transporte).

C. Requerimientos espaciales.

- Grúa de rehabilitación desmontable.
- Grúa de rehabilitación, capaz de soportar el peso, de las diversas piezas y componentes que conforman el exoesqueleto.
- Grúa de rehabilitación de fácil ensamble.
- Grúa de rehabilitación regulable a los requerimientos del paciente.

D. Requerimientos de apariencia.

- Grúa de rehabilitación agradable al usuario (cómodo y seguro).
- Grúa de rehabilitación que no lastime al paciente.

E. Requerimientos de conservación.

- Grúa de rehabilitación resistente a la corrosión del ambiente.
- Grúa de rehabilitación de larga vida útil.

3.6.2 Voz del ingeniero grúa de rehabilitación móvil

La voz del ingeniero encarga de convertir técnicamente los requerimientos de la voz de usuario, y se ha obtenido 4 características importantes para analizar el mecanismo de cadera regulable que son:

- A. Características económicas.
- B. Características de confort.
- C. Características de mecánicas.
- D. Características de duración.

Se toma en cuenta la clasificación antes mostrada, y las características quedan de la siguiente manera:

A. Características económicas.

- Costos.
- Mantenimiento.

B. Características de confort.

- Tamaño.
- Ergonómico.
- Soporte estructural seguro.

C. Características mecánicas.

- Dimensiones.
- Regulación.
- Material de construcción.
- Peso.
- Soporte de cargas.

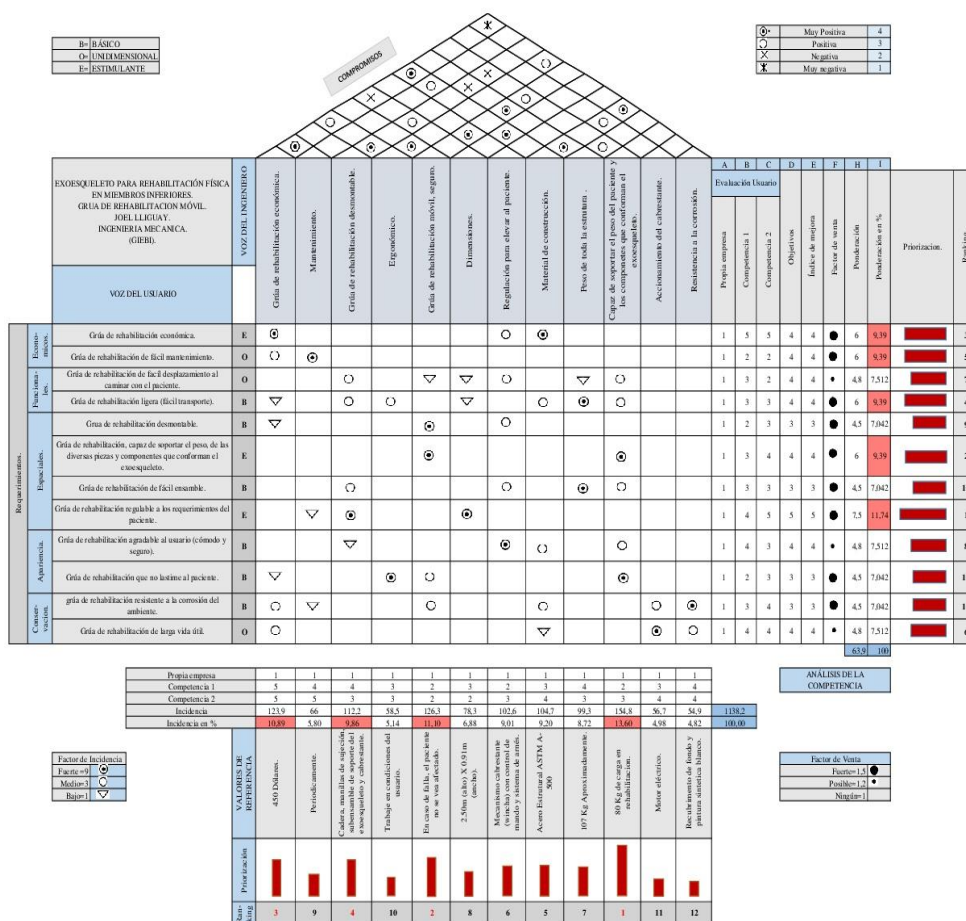
D. Características de duración.

- Tiempo de vida útil.
- Resistencia a la corrosión.

3.6.3 Resultados de la matriz de calidad

La matriz QFD que se muestra en la tabla 8-3 fue analizada y elaborada en base a las sugerencias de Carles Riba Romeva para el diseño concurrente. El análisis de esta matriz QFD se rige a los parámetros explicados en el punto 3.3.3.

Tabla 8-3: Desarrollo de la matriz QFD de la grúa de rehabilitación móvil



Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

3.6.4 Conclusiones obtenidas mediante la realización de la matriz de la calidad

Este punto es el más importante por que muestra el resultado de los requerimientos técnicos más significativos para la construcción de la grúa de rehabilitación móvil y se menciona a continuación:

- Grúa de rehabilitación móvil, capaz de soportar el peso del paciente y los componentes que conforman el exoesqueleto.
- Grúa de rehabilitación móvil, segura.
- Grúa de rehabilitación económica.
- Grúa de rehabilitación desmontable

Entonces en conclusión se puede decir que los requerimientos técnicos mencionados para la grúa de rehabilitación móvil deben ser lo suficientemente capaz de soportar el peso de los diversos componentes que constituyen el exoesqueleto, además de brindar seguridad al paciente. Dicha grúa también deberá ser económico y desmontable, debido a que estas cuatro características fueron los requerimientos más importantes al realizar la casa de la calidad.

3.7 Análisis funcional para la grúa de rehabilitación móvil

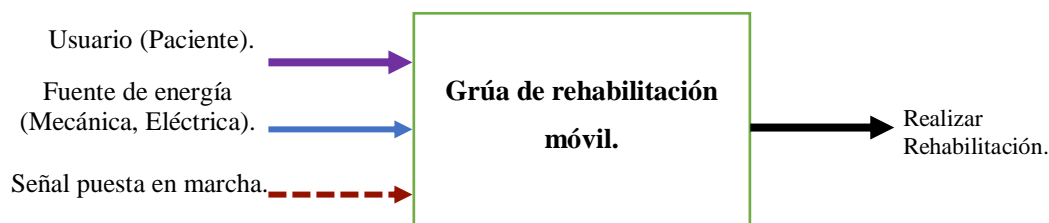


Figura 11-3: Función primaria de la grúa de rehabilitación móvil
Realizado por: Joel Lliguay 2018

En el primer nivel del análisis funcional las señales que ingresan son: el usuario o paciente que son considerados como material, la señal de energía en este caso es de forma mecánica, eléctrica y la señal de control es la puesta en marcha. Una vez analizado el primer nivel da prioridad a un análisis de funciones secundarias que es el nivel 2 y este detallan las funciones que se requieren para alcanzar el nivel 1 para el funcionamiento esperado para esta estructura.

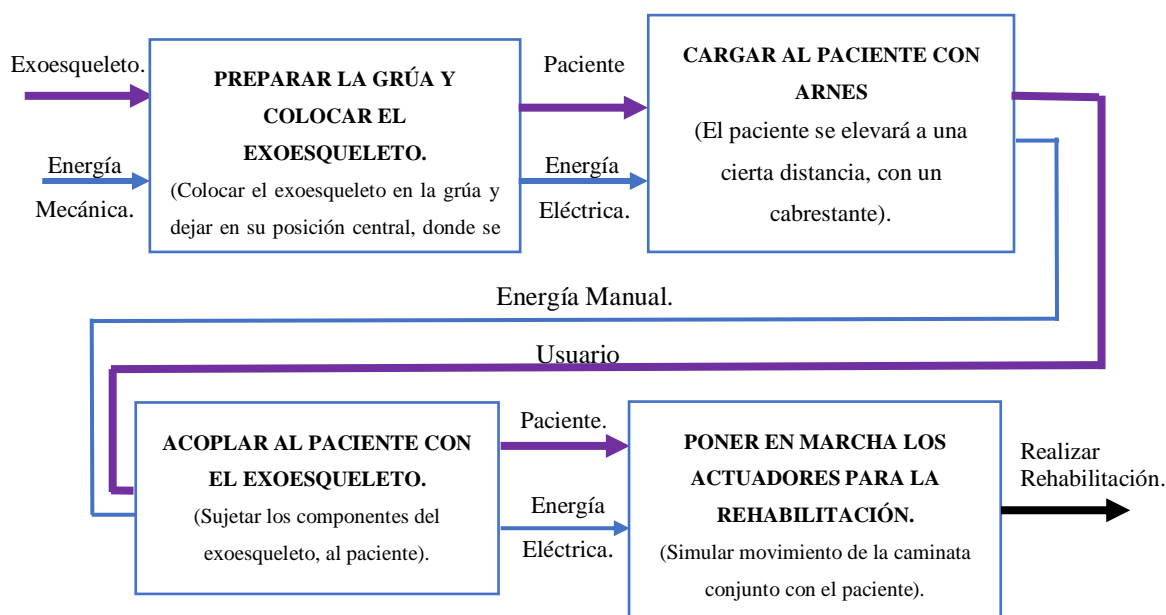


Figura 12-3: Diagrama de las funciones secundarias de la grúa de rehabilitación móvil.

Realizado por: Joel Lliguay 2018.

3.7.1 Definición de los módulos

Es necesario realizar la definición de módulos porque este divide el producto en varios bloques funcionales para determinar si existe la posibilidad de optimizar o disminuir costos y tiempos.

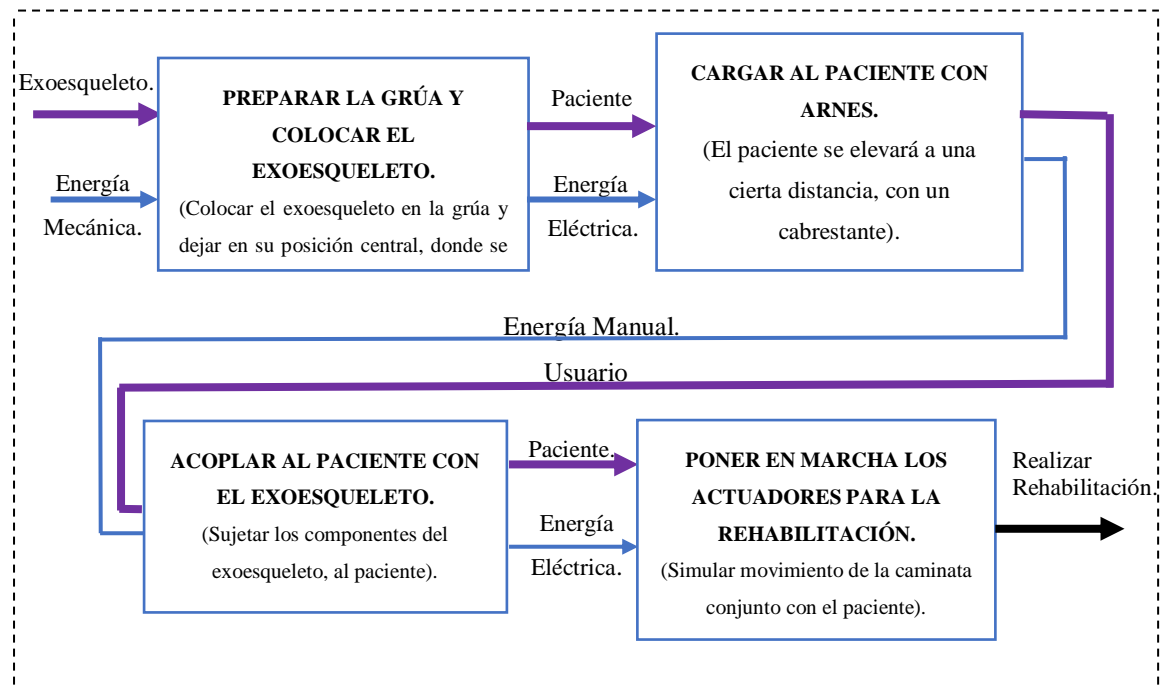


Figura 13-3: Diagrama de las funciones secundarias de la grúa de rehabilitación móvil.

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Las funciones permiten que el proceso se de en un solo módulo cumpliendo un conjunto de actividades desde la preparación de los componentes hasta realizar la rehabilitación.

3.7.2 Alternativas de solución

En la evaluación del diseño para la grúa de rehabilitación móvil, el módulo cumple con las siguientes funciones:

- Preparar la grúa y colocar el exoesqueleto.
- Cargar al paciente con arnés.
- Acoplar al paciente con el exoesqueleto.
- Poner en marcha los actuadores para la rehabilitación.

Para estas 4 posibles funciones se describe cada función del módulo para encontrar la mejor alternativa esperada.

3.7.2.1 Preparar la grúa y colocar el exoesqueleto

La grúa de rehabilitación debe estar estáticamente bien posicionada y el subensamble posicionar en el centro para colocar el exoesqueleto ensamblado.

- Ventajas. Fácil ensamble del mecanismo de cadera y de los componentes del exoesqueleto.
- Desventajas. La forma de acoplar es de modo manual y necesita realizar un esfuerzo corporal para ensamblar y mover los componentes.



Figura 14-3: Grúa con el exoesqueleto

Fuente: Autor

3.7.2.3 Cargar al paciente con arnés

Para elevar al paciente se coloca un sistema de arnés y es accionado a través de un cabrestante accionado con un motor eléctrico (huinche) con control de mando, para regular la altura dependiendo de los requerimientos del paciente.

Hay que recalcar que este sistema de elevación es tomado de un caso estudiado previamente en el estado del arte de exoesqueletos actuales, inspirado en el LOKOMAT para rehabilitación de la marcha.

- Ventajas. Puede elevar hasta 250 kg en una sola línea elevando el peso de la mayoría de pacientes y es capaz de elevar una altura de 11.58m en una sola línea es decir que no habrá problemas en elevar al paciente.
- Desventajas. El cabrestante es accionado por un motor eléctrico y cuando se opera produce un ruido que incomoda un poco la armonía.



Figura 15-3: Elevación del paciente

Fuente: Autor

3.7.2.4 Acoplar al paciente al exoesqueleto

El paciente elevado y el exoesqueleto montado en la grúa móvil se hace fácil el acoplamiento para colocar de forma segura, sin riesgo a lastimar al paciente.

- Ventajas. Fácil acople de los componentes con el paciente.
- Desventajas. La forma de acoplar es de modo manual.

3.7.2.5 Poner en marcha los actuadores para la rehabilitación

Se pone en marcha los actuadores y realiza la rehabilitación simulando la caminata respetando los rangos de movimientos estudiados anteriormente.

- Ventajas. Los actuadores (motores nema paso a paso) son muy precisos que garantiza los movimientos programados y el control de la velocidad.
- Desventajas. El torque es muy bajo en los actuadores seleccionados, pero para simular el movimiento en este prototipo es aceptable.

3.8 Alternativas del módulo

Para determinar una correcta alternativa de módulos, se debe comparar las ventajas y desventajas entre las 2 alternativas de solución que se muestran a continuación.

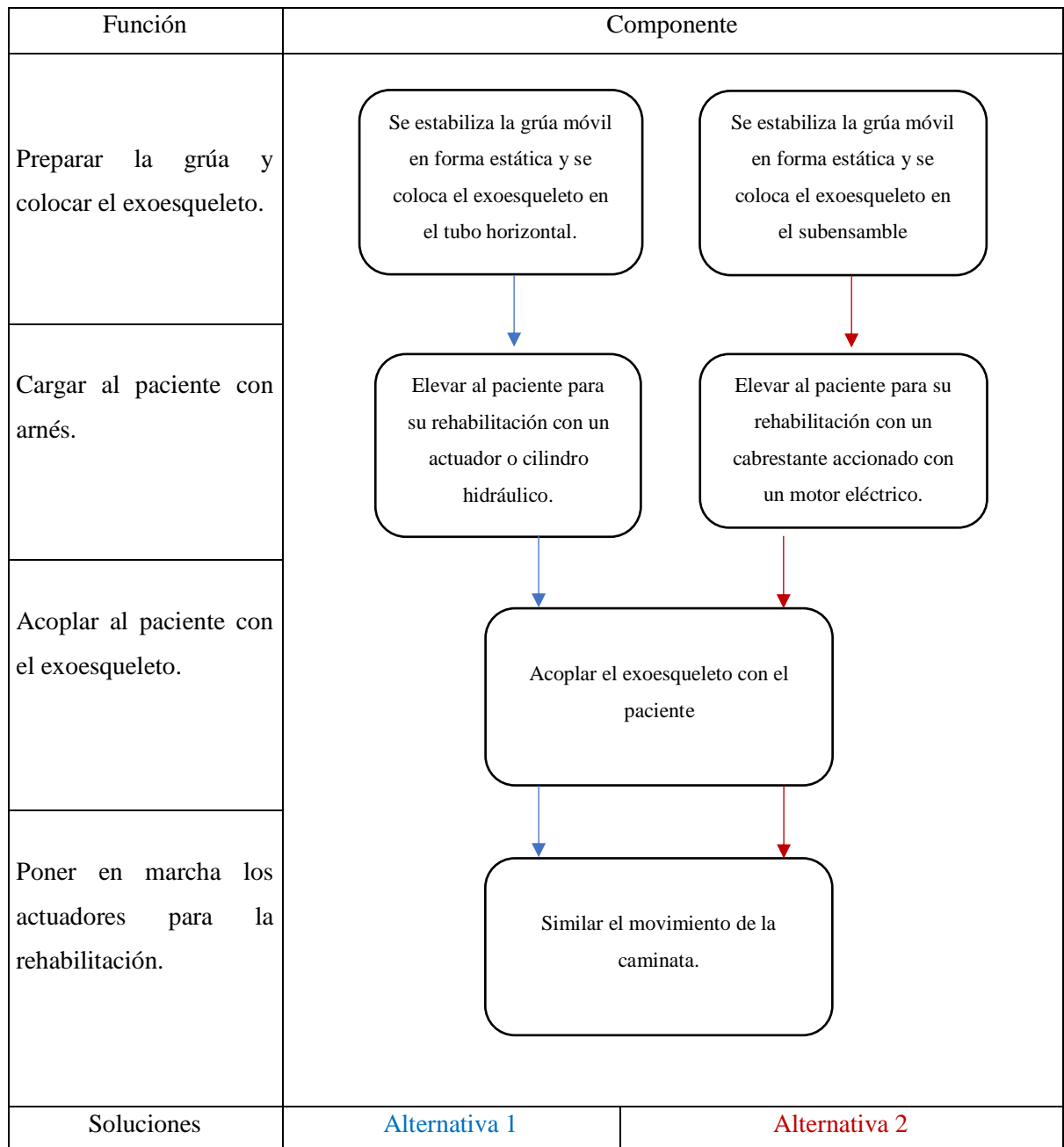


Figura 16-3: Posibles alternativas de solución de la grúa de rehabilitación móvil

Realizado por: Joel Lliguay 2018

La primera alternativa del mecanismo mostrado en la figura consiste en una estructura móvil que se acopla en el exoesqueleto a un tubo horizontal con una placa para ensamblar el mecanismo de cadera y se eleva al paciente mediante un cilindro hidráulico con un sistema de arnés para realizar la rehabilitación física.



Figura 17-3: Primera alternativa de la grúa de rehabilitación móvil

Fuente: Autor.

La segunda alternativa se muestra en la figura 30, es una estructura móvil que consta de un subensamble desmontable que en él se monta el mecanismo de cadera y los componentes de exoesqueleto y se eleva al paciente por medio de un cabrestante accionado por un motor eléctrico mediante un sistema de arnés para realizar la rehabilitación física.

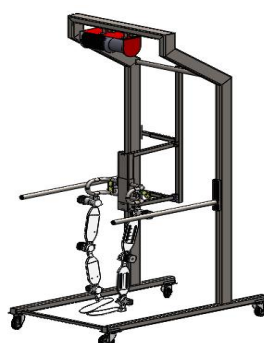


Figura 18-3: Segunda alternativa de la grúa de rehabilitación móvil.

Fuente: Autor

3.8.1 *Criterios de valoración del módulo*

Antes de analizar los criterios de valoración del módulo se mencionó anteriormente la evaluación de soluciones en la sección 3.5.1 y método ordinal corregido de criterios ponderados en 3.5.2 para aplicarlos y tener en cuenta para este estudio.

Los criterios de valoración más determinantes se detallan a continuación:

- Capaz de soportar el peso del paciente y los componentes que conforman el exoesqueleto. La estructura está diseñada para soportar las cargas que se producen al momento de realizar la rehabilitación.
- Grúa de rehabilitación móvil, segura. La estructura dese ser sumamente segura garantizando que el paciente no sufra una lesión si en caso llegue a falla la estructura.

- Grúa de rehabilitación económica. El motivo de este proyecto es buscar reducir costos de manufactura para que pueda ser fabricado en serie.
- Grúa de rehabilitación desmontable. Es necesario que la estructura sea desmontable para que se pueda retirar el subensamble ya que si la grúa no está con el exoesqueleto este puede comportarse como un andador para aquellas personas con dificultades para caminar, puedan desplazarse y moverse sin la ayuda de un tercero.

Tabla 9-3: Criterios ponderados

Ponderación	Soportar el peso del paciente y los componentes	Seguro	Económica	Desmontable	$\Sigma+1$	Ponderación
Soportar el peso del paciente y los componentes		0	1	1	3	0,25
Seguro	1		1	0,5	3,5	0,29
Económica	0	0,5		1	2,5	0,21
Desmontable	1	0	1		3	0,25
Suma					12	1

Realizado por: Joel Lliguay 2018
Fuente: Autor

Posteriormente se procede a realizar las respectivas soluciones con respecto a los criterios.

- Solución 1, representa a la primera alternativa de solución de la grúa de rehabilitación móvil.
- Solución 2, representa a la segunda alternativa de solución de la grúa de rehabilitación móvil.

Tabla 10-3: Evaluación de las soluciones (Soportar el peso del paciente y los componentes)

Soportar el peso del paciente y los componentes.	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0	1	0,333
Solución 2	1		2	0,667
Suma			3	1

Realizado por: Joel Lliguay 2018
Fuente: Autor

La evaluación resulta con Solución 1 < Solución 2.

Tabla 11-3: Evaluación de las soluciones (Seguro)

Seguro.	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0,5	1,5	0,5
Solución 2	0,5		1,5	0,5
Suma			3	1

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

La evaluación resulta con Solución 1 = Solución 2.

Tabla 12-3: Evaluación de las soluciones (Económica.).

Económica.	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0	1	0,333
Solución 2	1		2	0,667
Suma			3	1

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

La evaluación resulta con Solución 1 < Solución 2.

Tabla 13-3: Evaluación de las soluciones (Desmontable.).

Desmontable.	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0,5	1,5	0,429
Solución 2	1		2	0,571
Suma			3,5	1

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

La evaluación resulta con Solución 1 < Solución 2.

Tabla 14-3: Tabla de conclusiones

Conclusión	Soportar el peso del paciente y los componentes.	Seguro.	Económica.	Desmontable.	Σ	Prioridad
Solución 1	0,25x0,333	0,29x0,5	0,21x0,333	0,25x0,429	0,41	2
Solución 2	0,25x0,667	0,29x0,5	0,21x0,667	0,25x0,571	0,59	1

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

La grúa de rehabilitación móvil que más se ajusta a los criterios de la evaluación es la solución 2.

3.8.2 Características y elementos de la grúa de rehabilitación móvil

Es seleccionado la mejor alternativa, la cual cumple con todos los requerimientos del auspicante. El objetivo de esta estructura seleccionada es elevar al paciente para que realice su rehabilitación conjunta con el exoesqueleto. La rehabilitación que realiza es de forma estática es decir que la cadera y sus eslabones permanecen con el paciente es por eso por lo que se busca tener una gran sujeción y estabilidad. Este tiene la posibilidad de ser desmontable toda su estructura para que cumpla la función de un andador (caminador) para las personas con lesiones leves necesitan apoyo cuando quieran sostener y mantener el equilibrio mientras caminan reemplazando así las ortesis pasivas siendo de gran ayuda y mejor su rehabilitación, ya que se realizaron estudios que la rehabilitación elevando al paciente tiene más posibilidades de que este tenga más libertad de realizar todos sus movimientos respectivos de la caminata y se describe los elementos a continuación.

3.8.2.1 Mecanismo cabrestante con control de mando para la elevación del paciente y sistema de arnés

Para que la estructura cumpla con las funciones asignadas se requiere de un cabrestante siendo este un mecanismo compuesto por un rodillo o cilindro giratorio que alrededor del cual se enrolla un cable para levantar cargas en este caso es impulsado por un motor eléctrico conjunto con un sistema de arnés, estos dos componentes sirven para mantener al paciente en pie cuando cumpla la función de andador (caminador) y cuando sea necesario una rehabilitación con el exoesqueleto elevar al paciente. El peso máximo de carga que se estimo fue de 80 kg para una persona promedio. Para elevar al paciente se seleccionó una Wincha Tecle Eléctrico Hoist 250kg/ 500lb por las funciones y ventajas que nos brinda, aunque este sobre diseñada fue el más bajo en carga que se pudo encontrar en un precio económico y asequible en el mercado. El arnés se seleccionó por su forma fácil y segura de adaptarse al cuerpo, este se acopla a un gancho al cable del cabrestante, además fue modificado para la comodidad del paciente y su selección fue sencilla ya que se encuentra en el mercado como una herramienta de seguridad industrial.

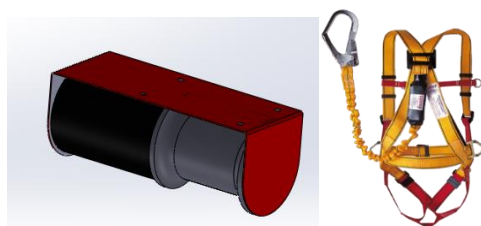


Figura 19-3: Sistema de elevación del paciente

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente:https://www.google.com.ec/search?q=arnes&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwicip7zNrqzZAhVBRK0KHbQB CSwQ_AUICigB&biw=1366&bih=588#imgsrc=WfPdHkA2qUlskM:

3.8.2.2 Estructura desmontable

Esta estructura es donde permite alojar al exoesqueleto y a su vez deslizarse de arriba hacia abajo la cadera. El sistema es estilo compuerta para la movilidad del exoesqueleto aun facilitándose por su estructura desmontable.

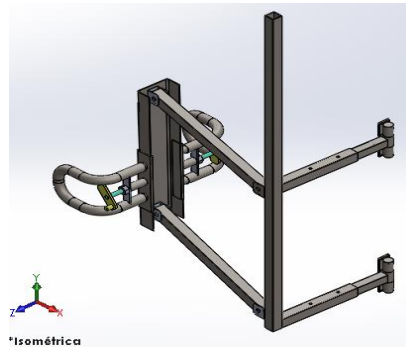


Figura 20-3: Estructura desmontable

Fuente: Autor

3.8.2.3 Tubos de empuñadura de apoyo deslizables, desmontables para las manos

Estos tubos de empuñadura de apoyo de manos ayudan al paciente a tener un control de dirección sobre la estructura y para no perder su equilibrio. Estas empuñaduras son desmontables para aquellos pacientes que siente que es innecesario al momento de su rehabilitación ya sea por motivos de comodidad o factores que impiden que esos tubos estén montados a la estructura.

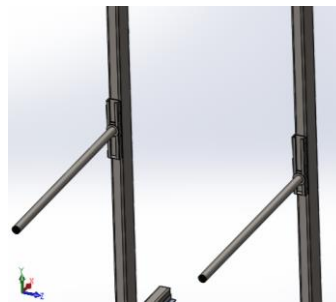


Figura 21-3: Tubos de empuñadura

Fuente: Autor

3.9 Análisis de las especificaciones del exoesqueleto

Los parámetros de las especificaciones del diseño mecánico y el dimensionamiento de las partes del exoesqueleto se tomaron de acuerdo con el “estudio anterior” además con un análisis previo del marco referencial de los exoesqueletos más actualizados en el campo de la bioingeniería y el estudio de la casa de la calidad. Las medidas antropométricas son basadas en el paciente seleccionado por el grupo de investigación (GIEBI).

3.9.1 Grados de libertad

Para este exoesqueleto se evaluó los grados de libertad necesarios, estos se encuentran en las articulaciones del miembro inferior es decir en la cadera, rodilla y tobillo. En estudios recientes según (Customizable Rehabilitation Lower Limb, 2012) han mostrado que los movimientos más importantes para realizar una rehabilitación son las de flexión/extensión de cadera y de rodilla es decir que no todos los grados de libertad del cuerpo humano son necesarios para llevar a cabo las tareas descritas anteriormente.

Para lograr los objetivos planteados se llega a la conclusión que para el rediseño de este exoesqueleto se necesita 6 grados de libertad.

La cadera consiste en cuatro grados de libertad con los movimientos de Flexión/Extensión y el de Aducción/Abducción, pero en este estudio solo se necesita de dos grados de libertad (Flexión/Extensión).

La rodilla consiste en dos grados de libertad con los movimientos de Flexión/Extensión.

El tobillo se diseña con dos grados de libertad que son los movimientos de Flexión/Extensión. Así justificando los 6 grados de libertad antes mencionados.

3.9.2 Propiedades técnicas y especificaciones del diseño mecánico del exoesqueleto

En el estudio anterior se realizó la casa de la calidad, donde se determinó las especificaciones como base del diseño del proyecto de acuerdo con su importancia. Se resume en dos tablas generalizando toda la información estudiada que sirve para el rediseño del exoesqueleto.

En la tabla 15-3 se indica las propiedades técnicas que se tomó en cuenta para el rediseño mecánico del exoesqueleto.

Tabla 15-3: Propiedades técnicas

PROPIEDADES TÉCNICAS DEL DISEÑO MECÁNICO PARA EL CONJUNTO DE EXOESQUELETO.		
N°	Descripción	Unidades de medida
1	Número de componentes.	#
2	Medidas de las piezas del dispositivo.	mm

3	Medidas antropométricas del paciente.	mm
4	Velocidad de los motores.	RPM
5	Par de los motores.	N*m
6	Ángulo de movimiento en articulaciones.	°
7	Peso del exoesqueleto.	kg
8	Peso del paciente.	kg
9	Resistencia de fluencia	σ_y
10	Esfuerzos.	$\frac{N}{m^2}$
11	Tolerancias.	mm
12	Peso de accesorios.	kg
13	Módulo de Young.	E

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

En la 16-3 se indica las especificaciones del diseño que se tomó en cuenta para el rediseño mecánico del exoesqueleto.

Tabla 16-3: Especificaciones del diseño mecánico

ESPECIFICACIONES DEL DISEÑO MECÁNICO DE UN EXOESQUELETO.		
N°	Descripción	Magnitudes y unidad de medida
1	Dimensiones de las piezas del exoesqueleto	Adecuado al paciente [mm]
2	Torque dinámico en las articulaciones	<ul style="list-style-type: none"> Cadera: 7,6 [N*m] Rodilla: 0,15 [N*m] Tobillo: 0,215 [N*m]
3	Torque estático en las articulaciones	<ul style="list-style-type: none"> Cadera: 7,07 [N*m] Rodilla: 2,80 [N*m] Tobillo: 0,196 [N*m]
4	Rango de movimiento en las articulaciones	<ul style="list-style-type: none"> Cadera Flexión-Extensión -20° a 90° Rodilla Flexión-Extensión 0° a -90° Tobillo Flexión-Extensión 50° a -30°
5	Peso del dispositivo	Aproximadamente 11.463 [kg]
6	Peso del paciente	Menor o igual a 80 [kg]

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

3.9.3 Medidas principales del exoesqueleto

Las medidas principales del exoesqueleto dependen de las medidas antropométricas del paciente seleccionado, para mejor referencia se tomó los puntos entre ejes de la cadera y rodilla, entre ejes de la rodilla y tobillo y entre el eje del tobillo y la planta del pie.

3.9.3.1 Medida entre los ejes de la cadera y rodilla (C-R)

Esta medida indica la longitud máxima y mínima entre la articulación de la cadera y la articulación de la rodilla este conforma la parte del muslo, su longitud es regulable con el objetivo de no solo adaptarse a la medida antropométrica del paciente sino acoplarse a varios usuarios.

3.9.3.2 Medida entre los ejes de la rodilla y tobillos (R-T)

Esta medida indica la longitud máxima y mínima entre la articulación de la rodilla y la articulación del tobillo este conforma la parte de la pantorrilla, su longitud es regulable con el objetivo de no solo adaptarse a la medida antropométrica del paciente sino acoplarse a varios usuarios.

3.9.3.3 Medida del eje del tobillo a la planta del pie (T-P)

Esta medida indica la longitud entre la articulación del tobillo y la planta del pie situada desde el piso este conforma la parte del pie siendo estas medidas del estudio antropométrico del paciente.

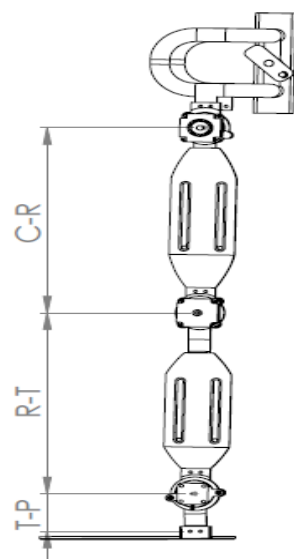


Figura 22-3: Medidas principales del exoesqueleto

Fuente: Autor

Tabla 17-3: Dimensiones principales del exoesqueleto

Partes	Posición mínima (mm)	Posición máxima (mm)
Cadera – Rodilla	370	390
Rodilla- Tobillo	360	380
Tobillo – planta de pie	80	80

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

3.9.4 Características y elementos del diseño final de exoesqueleto

A continuación, se presenta el modelo final del exoesqueleto y se describe cada uno de los componentes que forma el exoesqueleto.

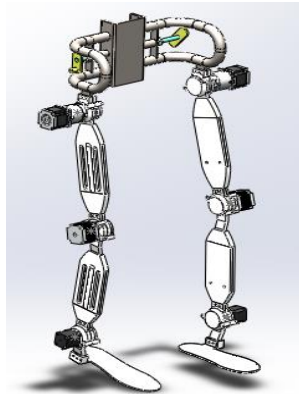


Figura 23-3: Exoesqueleto final

Fuente: Autor

3.9.4.1 Mecanismo de cadera

Es el componente más importante, porque va a soportar todo el peso de los componentes del exoesqueleto, los motores, eslabones etc., además regulándose con la grúa de rehabilitación con desplazamientos de arriba y abajo, este mecanismo de adapta a diferentes medidas antropométricas de caderas.

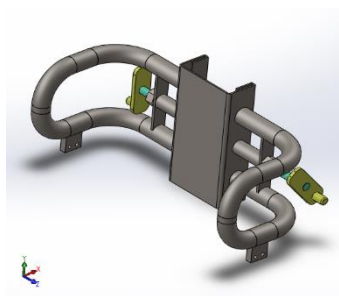


Figura 24-3: Cadera exoesqueleto

Fuente: Autor

3.9.4.2 *Articulación de cadera externa*

Esta pieza es diseñada para dar el movimiento del muslo, tiene la facilidad de alojar al rodamiento, al eje y acoplar al motor seleccionado para la cadera mediante pernos, posee dos orejas para ajustar con pernos a la articulación de cadera interna.

Esta articulación consta con topes para asegurar el rango de los ángulos de flexión y extensión estudiados para el movimiento del muslo. Tiene una entrada superior para alojar al eslabón de sujeción de cadera mediante pernos.

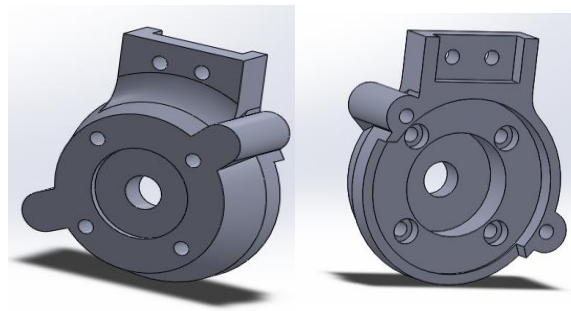


Figura 25-3: Articulación de cadera externa

Fuente: Autor

3.9.4.3 *Articulación de cadera interna*

Esta pieza es diseñada para dar el movimiento del muslo, tiene la facilidad de alojar al rodamiento, y al eje. Posee dos orejas para ajustar con pernos a la articulación de cadera externa. Esta articulación consta con topes para asegurar el rango de los ángulos de flexión y extensión estudiados para el movimiento del muslo. Tiene una entrada superior para alojar al eslabón de sujeción de cadera mediante pernos.

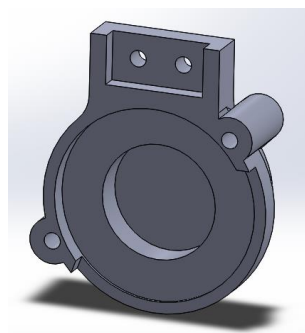


Figura 26-3: Articulación de cadera interna

Fuente: Autor

3.9.4.4 *Eslabón muslo superior*

Esta pieza permite ubicarse en la articulación de cadera, además tiene una facilidad de ensamble con el eslabón de muslo inferior basado en el mecanismo de cola de milano que permite regular y ajustar a varias medidas entre la cadera y rodilla de acuerdo con la tabla 17-3, se desliza el perno mediante las dos perforaciones alargadas (ojo chino) realizadas en la pieza. En la parte superior se encuentra el agujero con chaveteros por el cual se aloja el eje con sus reactivas chavetas para que impida deslizamientos entre el eje y el eslabón.

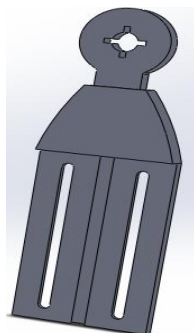


Figura 27-3: Eslabón muslo superior

Fuente: Autor

3.9.4.5 *Eslabón muslo inferior*

Esta pieza tiene una facilidad de ensamble con el eslabón de muslo superior basado en el mecanismo de cola de milano que permite regular y ajustar a varias medidas entre la cadera y rodilla de acuerdo con la tabla 17-3, para su ajuste consta con dos perforaciones realizadas para el ingreso de los pernos. En la parte inferior está diseñada para que se acople con facilidad en la articulación de rodilla mediante pernos y así unir el muslo con la rodilla.

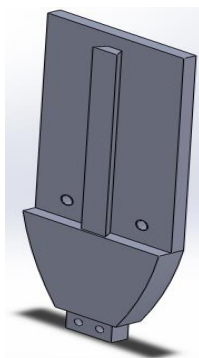


Figura 28-3: Eslabón muslo inferior

Fuente: Autor

3.9.4.6 *Articulación de rodilla externa*

Esta pieza es diseñada para dar el movimiento deseado a la pantorrilla. Esta pieza tiene la facilidad de alojar al rodamiento, al eje y acoplar al motor seleccionado para la rodilla mediante pernos, posee dos orejas para ajustar con pernos a la articulación de rodilla interna. Esta articulación consta con topes para asegurar el rango de los ángulos de flexión y extensión estudiados para el movimiento de la pantorrilla. Tiene una entrada superior para alojar al eslabón de muslo inferior y así unir el muslo con la rodilla mediante pernos.

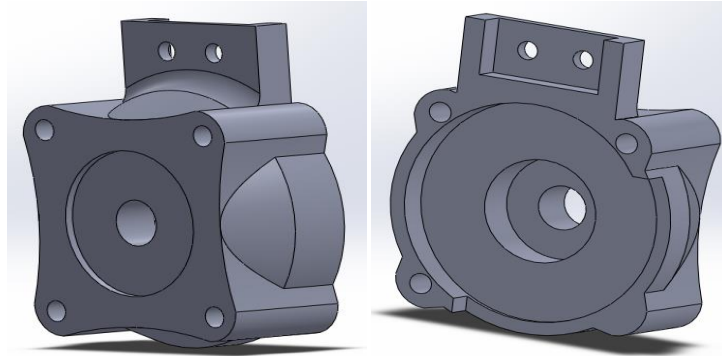


Figura 29-3: Articulación de rodilla externa

Fuente: Autor

3.9.4.8 *Articulación de rodilla interna*

Esta pieza es diseñada para dar el movimiento esperado de la pantorrilla, tiene la facilidad de alojar al rodamiento y al eje. Posee dos orejas para ajustar con pernos a la articulación de rodilla externa. Esta articulación consta con topes para asegurar el rango de los ángulos de flexión y extensión estudiados para el movimiento de la pantorrilla. Tiene una entrada superior para alojar al eslabón de muslo inferior y así unir el muslo con la rodilla mediante pernos.

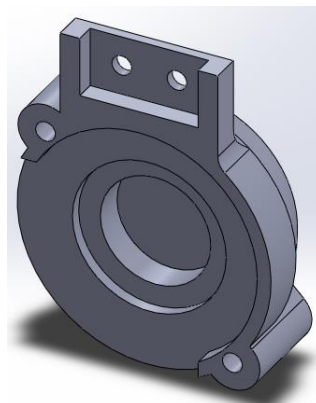


Figura 30-3: Articulación de rodilla interna

Fuente: Autor

3.9.4.9 *Eslabón pantorrilla superior*

Esta pieza permite ubicarse en la articulación de rodilla, tiene una facilidad de ensamble con el eslabón de pantorrilla inferior, basado en el mecanismo de cola de milano permite regular y ajustar a varias medidas entre la rodilla y el tobillo de acuerdo con la tabla 17-3, se desliza el perno mediante las dos perforaciones alargadas (ojo chino) realizadas en la pieza. Tiene una curvatura hacia adentro para la ergonomía del exoesqueleto para situarse en la posición correspondiente del cuerpo. En la parte superior se encuentra el agujero con chaveteros por el cual se aloja el eje con sus reactivas chavetas para que impida deslizamientos entre el eje y el eslabón.

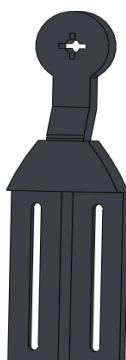


Figura 31-3: Eslabón pantorrilla superior

Fuente: Autor

3.9.4.10 *Eslabón muslo inferior*

Esta pieza tiene una facilidad de ensamble con el eslabón de pantorrilla superior basado en el mecanismo de cola de milano que permite regular y ajustar a varias medidas entre la rodilla y tobillo de acuerdo con la tabla 17-3, para su ajuste consta con dos perforaciones realizadas para el ingreso de los pernos. En la parte inferior está diseñada para que se acople con facilidad en la articulación del tobillo mediante pernos y así unir la pantorrilla con el tobillo.

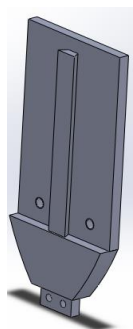


Figura 32-3: Eslabón pantorrilla inferior

Fuente: Autor

3.9.4.11 *Articulación de tobillo externo*

Esta pieza es diseñada para dar el movimiento deseado al eslabón del pie. Esta pieza tiene la facilidad de alojar al rodamiento, al eje y acoplar al motor seleccionado para el tobillo mediante pernos, posee dos orejas para ajustar con pernos a la articulación de tobillo interna. Esta articulación consta con topes para asegurar el rango de los ángulos de flexión y extensión estudiados para el movimiento del pie. Tiene una entrada superior para alojar al eslabón de la pantorrilla inferior y así unir la pantorrilla con el tobillo mediante pernos.

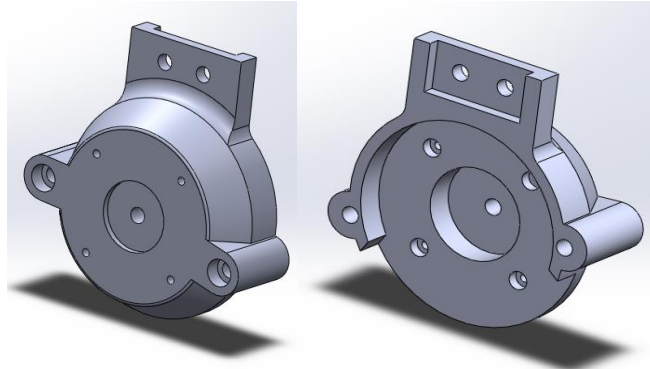


Figura 33-3: Articulación tobillo externo

Fuente: Autor

3.9.4.12 *Articulación de tobillo interno*

Esta pieza es diseñada para dar el movimiento deseado al eslabón del pie, tiene la facilidad de alojar al rodamiento y al eje. Posee dos orejas para ajustar con pernos a la articulación de tobillo interno. Esta articulación consta con topes para asegurar el rango de los ángulos de flexión y extensión estudiados para el movimiento del pie. Tiene una entrada superior para alojar al eslabón de pantorrilla inferior y así unir la pantorrilla con el tobillo mediante pernos.

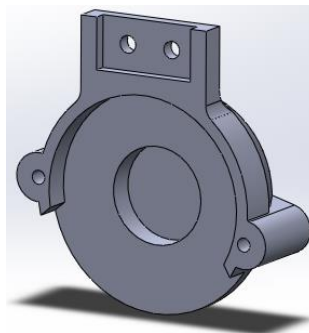


Figura 34-3: Tobillo interno

Fuente: Autor

3.9.4.13 *Eslabón tobillo-pie*

Esta pieza permite ubicarse en la articulación del tobillo, tiene una facilidad de ensamble con el pie. Tiene una curvatura hacia adentro para la ergonomía del exoesqueleto para situarse en la posición correspondiente del cuerpo. En la parte superior se encuentra el agujero con chaveteros por el cual se aloja el eje con sus reactivas chavetas para que impida deslizamientos entre el eje y el eslabón.

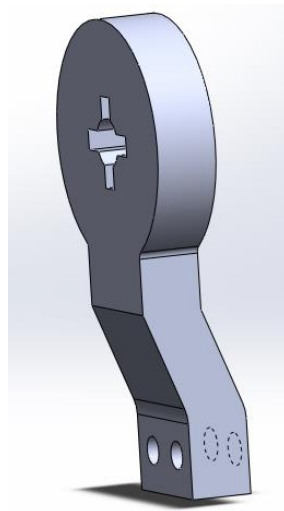


Figura 35-3: Eslabón tobillo-pie

Fuente: Autor

3.9.4.14 *Pie*

Esta pieza se adapta a la planta del pie se basa en la plantilla de un zapato estándar, de fácil acoplamiento al costado externo del pie con el eslabón tobillo-pie mediante pernos.

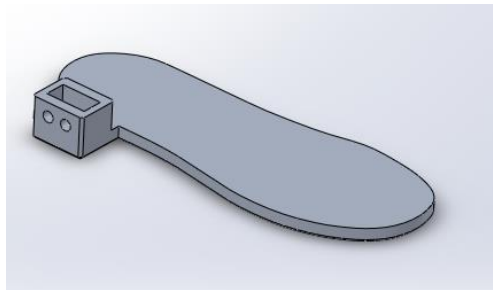


Figura 36-3: Pie

Fuente: Autor

CAPÍTULO IV

4. MANUFACTURA

Este es el capítulo más significativo y se detallara la construcción del conjunto de exoesqueleto para rehabilitación física en miembros inferiores. Pero antes de comenzar con la construcción se analiza y estudia las investigaciones previas, del grupo de investigación (GIEBI) presentado en un proyecto de titulación “DISEÑO MECÁNICO ESTRUCTURAL DE UN EXOESQUELETO ORIENTADO A LA REHABILITACIÓN PARA EXTREMIDADES INFERIORES DE PACIENTES MASCULINOS DE EDAD PRODUCTIVA EN LA CIUDAD DE RIOBAMBA” (Aguirre, et al., 2017) y desde ahora en adelante para nombrar a esta investigación se mencionara “estudio anterior” y dicha investigación es basada en la marcha en movimiento es decir que el exoesqueleto se acopla a los miembros inferiores y se desplaza junto con el paciente, la cadera y sus eslabones, se realizaron modificaciones pertinentes en base a más estudios y mejoras actuales ya que el prototipo de exoesqueleto que ahora se pretende fabricar en comparación al anterior estudio, se muestra que el tipo de rehabilitación en los miembros inferiores es de forma estática, es decir que la cadera y sus eslabones permanecen con el paciente y para conseguirlo se elevara a una cierta distancia del piso con ayuda de una grúa móvil de rehabilitación (estructura que soporta el peso del exoesqueleto y de la persona) con la finalidad de todos sus movimientos como Flexión-Extensión, Abducción-Aducción etc. sea realizado con más facilidad.

En el diseño modificado y mejorado del exoesqueleto (Rossa, y otros) se analizará una nueva selección de materiales para la construcción del exoesqueleto y el cálculo de los torques en cada articulación de la pierna medidos en Adams para que de esta forma se pueda seleccionar el actuador a utilizar, seguidamente la descripción de la fabricación y montaje.

4.1 Selección de materiales

En el proceso de diseño la selección de materiales es un punto muy importante y el objetivo primordial de la selección de materiales es dar mayor prioridad a ciertas propiedades físicas optimas en el diseño, dejando en segundo plano aquellas variables que no son prioritarias sin descartas.

También la dificultad de selección de materiales se debe a la enorme cantidad de materiales disponibles entre la mayoría están los metales, cerámicas, plásticos, materiales compuestos, etc. es decir aproximadamente (entre 50.000 y 100.000 materiales) que están a disposición de las personas que diseñan objetos e instrumentos. (Rossa, y otros).

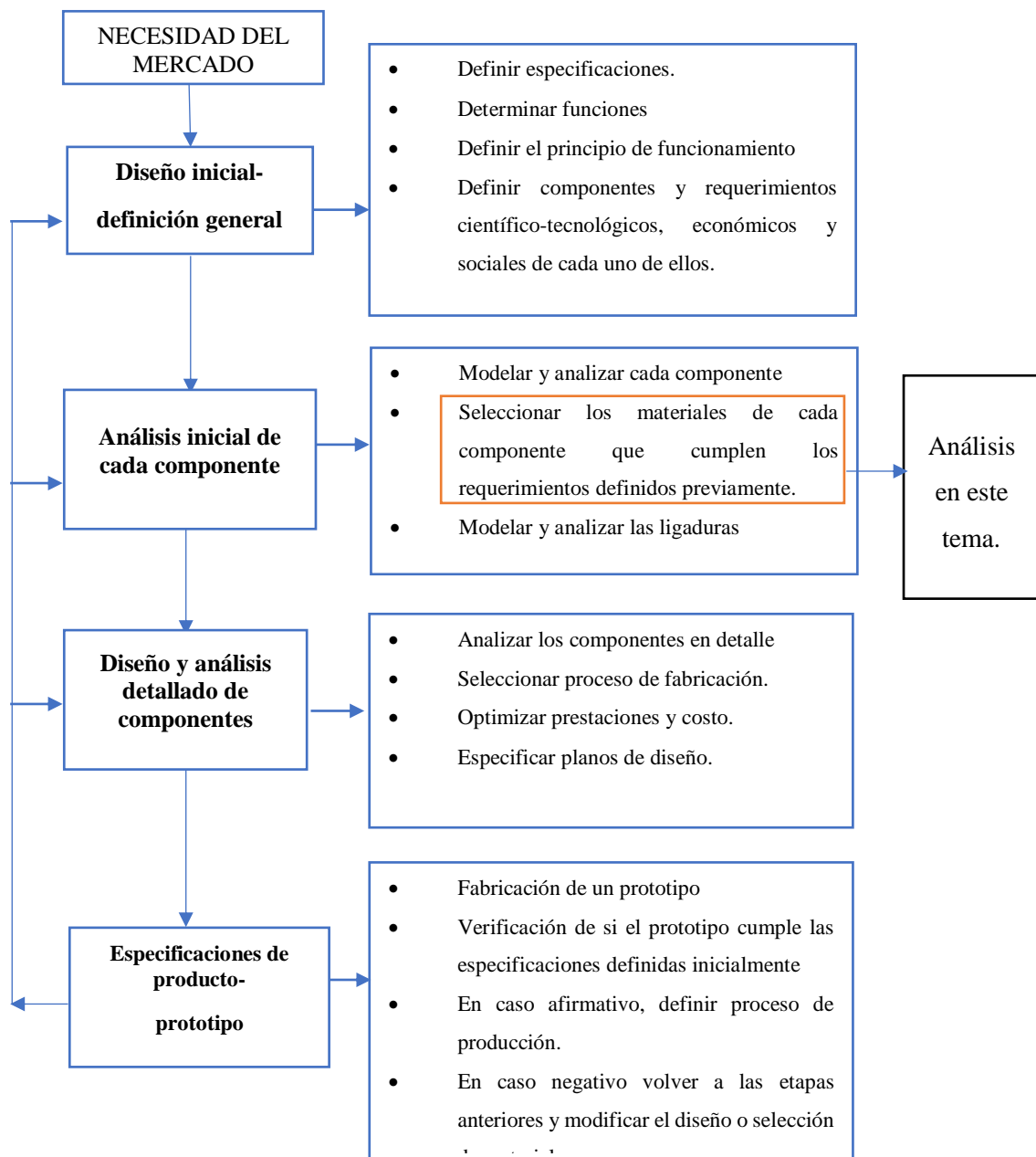


Figura 1-4: Diagrama de bloques del proceso de diseño

Fuente: https://es.slideshare.net/betorossa/diseo-y-seleccion-de-materiales-tecnologia-de-materiales?from_action=save.

Tabla 1-4: Propiedades generales de los diferentes tipos de materiales

Materiales	Puntos Fuerte	Debilidades
Metales	Rigidez ($E \approx 100 \text{ GPa}$) Ductilidad => Moldeabilidad Tenacidad ($K_{IC} > 50 \text{ MPa m}^{1/2}$) Elevado punto de fusión ($T_m \approx 1000 \text{ }^\circ\text{C}$) Elevada resistencia al choque térmico ($\Delta T \approx 500 \text{ }^\circ\text{C}$) Elevadas conductividades eléctricas y térmicas	Se deforman plásticamente ($\sigma_f \approx 1 \text{ Mpa}$)=> Aleaciones Baja dureza ($H \approx 3 \sigma_f$)=> Aleaciones Baja resistencia a la fatiga ($\sigma_e \approx \frac{1}{2} \sigma_f$). Elevada resistencia a la corrosión => recubrimientos.
Cerámicas	Rigidez ($E \approx 200 \text{ GPa}$) Elevada resistencia a la fluencia y duras ($\sigma_f \approx 3 \text{ GPa}$). Elevado punto de fusión ($T_m \approx 2000 \text{ }^\circ\text{C}$) Densidad moderada. Resistencia a la corrosión.	Muy baja Tenacidad ($K_{IC} \approx 2 \text{ MPa m}^{1/2}$). Baja resistencia al choque térmico ($T_m \approx 200 \text{ }^\circ\text{C}$). - Dificultad de moldeo => Métodos de polvo.
Polímeros	Ductilidad y Moldeabilidad Resistencia a la corrosión. Baja densidad Bajas conductividades eléctricas y térmicas	Baja rigidez ($E \approx 2 \text{ GPa}$). Elevada fluencia ($\sigma_f \approx 2 - 100 \text{ Mpa}$) Baja temperatura de transición vítrea ($T_g \approx 100 \text{ }^\circ\text{C}$) => fluyen a baja temperatura. Tenacidad media ($K_{IC} \approx 1 \text{ MPa m}^{1/2}$)
Materiales compuestos	Rigidez ($E > 50 \text{ GPa}$). Resistencia mecánica ($\sigma_f \approx 200 \text{ MPa}$). Tenacidad ($K_{IC} > 50 \text{ MPa m}^{1/2}$) Resistencia a la fatiga. Resistencia a la corrosión. Baja densidad.	Dificultad de moldeo. Elevado costo. Elevada fluencia (Matrices poliméricas)

Fuente: https://es.slideshare.net/betorossa/diseo-y-seleccion-de-materiales-tecnologa-de-materiales?from_action=save.

Módulo de elasticidad E, Punto de fusión Tm, Tenacidad a la fractura Kic, Temperatura de transición vítrea (Tg).

4.1.1 *Método de selección del material*

Los métodos de selección de materiales son varios y uno de los más desatacados es el método de selección tradicional, este método se basa en la experiencia del ingeniero, es decir el ingeniero realiza una selección del material empírica en base a su criterio en los conocimientos de materiales que se utilizan en aplicaciones similares. (La importancia del metodo en la selección de materiales, 2004). Hay que dar un reconocimiento a este método porque ayuda como un primer acercamiento a la selección de materiales, pero este método no es garantizado, debido a que se emplea en un escenario poco realista aumentando las probabilidades de falla, y debe acompañarse con un método que use parámetros de selección

Analizando todos los parámetros que influyen en la selección de materiales se indago un método que se usara para la construcción del prototipo. El método que usarse es la metodología de Michael Ashby, ya que en este se puede tener una gran gama de posible selección de materiales que cumplan con las restricciones establecidas por el diseñador.

4.2 **Metodología de Michael Ashby**

La metodología de Michael Ashby indica la manera de cómo se optimice la función de rendimiento de cada una de las características de los materiales, para definir el desempeño del exoesqueleto con una búsqueda de valores para las condiciones extremas a las que será sujeto el material.

La función analiza tres elementos, la primera las cargas, hacen parte de los requerimientos funcionales, (F) del elemento es decir la fuerza de sometimiento del cuerpo, la forma definida y delimitada son los requerimientos geométricos, (G) del elemento en este caso seria las medidas del cuerpo y el tercer elemento indica las propiedades mecánicas y características del material (M) (Ashby, 2005).

Ecuación de performance:

$$P = \left[\left(\begin{array}{c} \text{Funcional} \\ \text{Requeriments, F} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{Geometric} \\ \text{Parameters, G} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{Material} \\ \text{Properties, M} \end{array} \right) \right]$$
$$P = f(F, G, M)$$

Los tres elementos se resumen en una ecuación (P), expresado como parámetros separables que indica que la selección puede realizarse maximizando o minimizando el término que se considere para el exoesqueleto la ecuación es:

$$P = f_1(F) \cdot f_2(G) \cdot f_3(M)$$

Ecuación 1-4: Ecuación performance

Para que la metodología tenga buenos resultados se realizará por medio de 3 tapas:

- Definición de requerimientos para el exoesqueleto
- Cálculo del índice o índices del material para la aplicación
- Selección del material usando el índice de material y los mapas de selección de materiales

4.2.1 *Requerimientos científico-tecnológicos.*

4.2.1.1 Requerimientos específicos debe cumplir el material

Cargas, temperaturas, condiciones atmosféricas, conductividades térmicas y eléctricas requeridas, aspecto superficial, etc. (Rossa, y otros)

4.2.1.2 *Requerimientos económicos*

Coste por unidad de peso o volumen, su importancia depende del sector en el que esté. Se debe tener en cuenta coste de la materia prima, del proceso de fabricación y del transporte. (Rossa, y otros)

4.2.1.3 *Requerimientos socio-ecológicos*

Aspectos medioambientales, seguridad, normativa específica, reciclabilidad, biodegradabilidad, etc. (Rossa, y otros)

4.2.2 *Índice del material para el exoesqueleto*

El índice del material es la combinación de propiedades de los materiales en la ecuación de la función, limitada por una propiedad del material o un grupo de materiales, siendo este último el caso de estudio. (Ashby, 2011)

Debido a las diferentes formas anatómicas de los miembros inferiores, se necesita incrementar su resistencia y disminuir el peso en las piezas a fabricar.

El espesor en este caso la sección transversal de la pieza está en manos del diseñador para modificar con total libertad y lograr los objetivos planteados. En la Figura 2-4 se observa cómo las piezas y los componentes estarán sometidos a un esfuerzo de compresión por el peso del paciente y el propio peso del dispositivo.

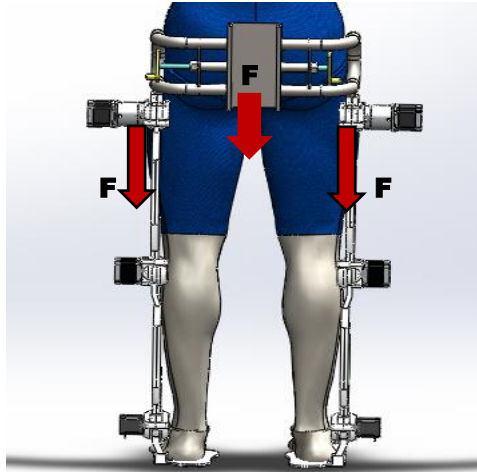


Figura 2-4: Fuerzas de Compresión Aplicadas al Exoesqueleto
Fuente: Autor

4.2.2.1 Restricciones:

- La longitud está limitada de acuerdo con la medida antropométrica del paciente.
- Debe soportar la carga (F) de compresión sin fallar ni fracturarse.

4.2.2.2 Función Objetivo:

- Minimizar la masa de las piezas para no hacerla tan pesada.

Maximizar	σ_y (Esfuerzo de fluencia).
Minimizar	Peso

4.2.2.3 Variables Libres

- El área de la sección transversal es relativamente una variable libre, ya que el espesor del material impone el diseñador.
- Se puede escoger libremente cualquier otro material.

4.2.2.4 Función a Minimizar

La función por minimizar es el peso del dispositivo, para que tenga el menor peso posible y sea lo suficientemente resistente para acoplar al paciente sin sufrir alguna fractura o daño. Partimos de una ecuación de la densidad porque en ella contiene los parámetros de estudio:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

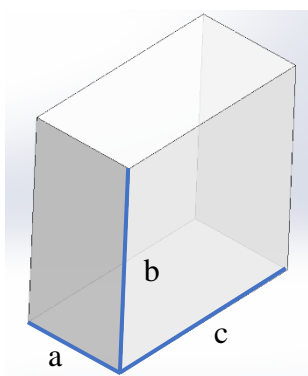
Ecuación 2-4: Ecuación densidad

Despejamos la masa por ser el factor importante que influye en el peso del dispositivo y es el parámetro que se busca minimizar.

$$m = \rho V$$

La ecuación de la masa será la función objetivo y está en función de la densidad del material y el volumen.

La restricción de la pieza se analiza en el volumen para una simplicidad de estudio se analiza en un paralelepípedo mostrado en la siguiente figura:



m = masa
A = área
V = volumen
b = longitud
 ρ = densidad
 σ_y = esfuerzo de fluencia o limite elástico

Figura 3-4: Prisma rectangular

Fuente: Autor

Variables:

a	Base de la sección transversal.
b	En función de las medidas antropométricas del usuario
c	Espesor

La variable libre será “c”, por qué es posible hacer esta sección sea de mayor o menor espesor sin alterar la función, pero la longitud “b” no es posible modificar porque esta variable está en función de las medidas antropométricas del paciente.

$$V = a * b * c$$

Ecuación 3-4: Ecuación volumen

Basándose en la ecuación de esfuerzo y sustituyendo las variables del área transversal de la pieza, como se muestra a continuación:

$$\sigma_y = \frac{F}{A}$$

Ecuación 4-4: Ecuación esfuerzo

Donde $A = a * c$ y se reemplaza: $\sigma_y = \frac{F}{a * c}$

Despejando a la variable libre la ecuación previamente mostrada, se obtiene:

$$c = \frac{F}{\sigma_y * a}$$

Se sustituye la variable libre en la función objetivo, apoyándose en la del volumen V :

$$m = \rho * V$$

$$m = \rho * a * b * c$$

Sustituyendo la variable libre: $m = \rho * a * b * \left(\frac{F}{\sigma_y * a} \right)$

$$m = \rho * b * \left(\frac{F}{\sigma_y} \right)$$

$$m = \frac{\rho * b * F}{\sigma_y}$$

Reemplazando en la ecuación de performance y obtener índice de funcionalidad (M),

F= Condición del problema: en este caso es la variable F

G = Geometría del componente: en este caso es la variable b

M = Propiedades del material: en este caso son las variables ρ ,

$$P = f_1(F) \cdot f_2(G) \cdot f_3(M)$$

$$P = f_1(F) \cdot f_2(b) \cdot f_3\left(\frac{\rho}{\sigma_y}\right)$$

$$m \downarrow \rightarrow \frac{\sigma_y}{\rho} \uparrow$$

Índice del material.

$$M = \frac{\sigma_y}{\rho}$$

4.2.3 Mapas de selección de materiales

Índice de mapa de Ashby $M = \frac{\sigma_y}{\rho} \frac{e_{jey}}{e_{jex}}$

Despejando $\sigma_y = M \cdot \rho$

Usando Logs $\log \sigma_y = \log(M \cdot \rho)$

Propiedades de logaritmos $\log \sigma_y = \log(M) + 1 \log(\rho)$

Relación con la función lineal

$$y = b + mx \quad m = 1$$

Índice	Pendiente
$\frac{\sigma_y}{\rho}$	1

La pendiente satisface las características indicadas, es esfuerzo sobre densidad del material. Teniendo estos dos parámetros, se selecciona la correcta gráfica de Ashby, en este caso se tiene la de densidad en el eje X y el esfuerzo de fluencia en el eje Y, también se señala la pendiente obtenida, trazando una línea paralela en la Figura 4-4

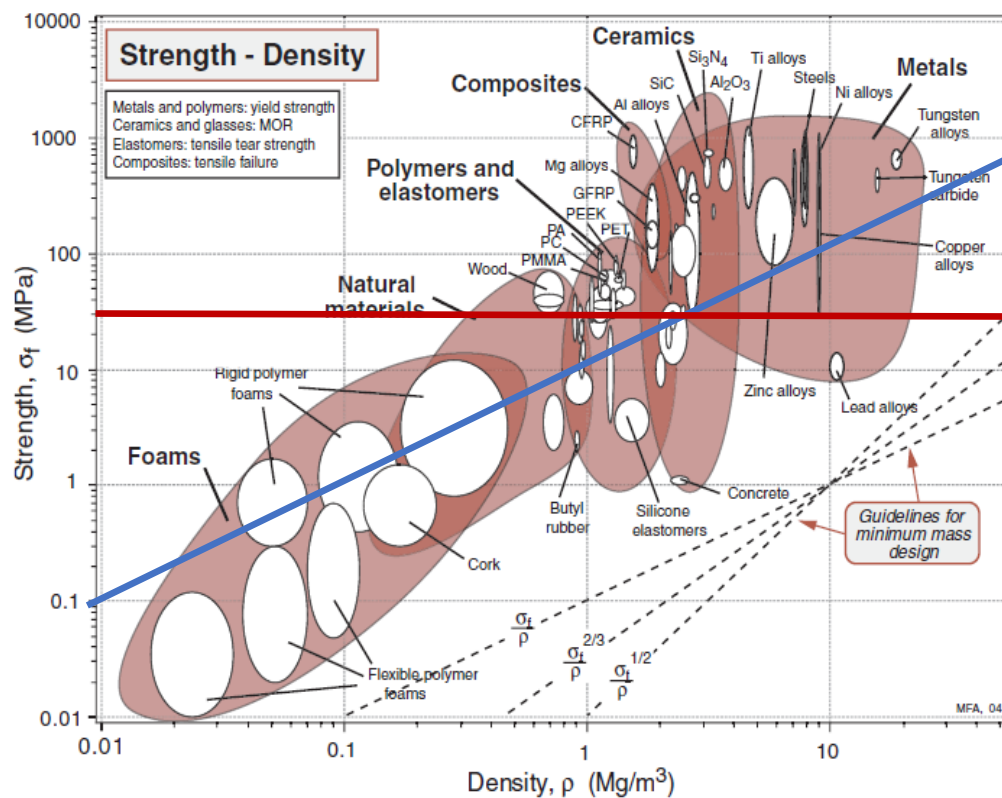


Figura 4-4: Mapa Ashby esfuerzo vs densidad

Fuente: Ashby, Michael F. 2005. *Materials Selection in Mechanical Design*. s.l. : BUTTERWORTH-HEINEMANN, 2005. ISBN 0 7506 6168 2.

Los resultados del método de Ashby son los siguientes: Los materiales que pueden ser implementados para la construcción de los eslabones, son materiales de las familias de los aceros, aluminios aleados, algunas cerámicos de alta densidad, polímeros y aleaciones de zinc, una vez determinadas las familias principales de materiales se inicial la buscan de los materiales más relevantes y comunes dentro de cada categorización que cumplan con los requerimientos mínimos para la aplicación, evaluando propiedades mecánicas, procesos de mecanizado, costos y accesibilidad.

4.3 Selección de los materiales del conjunto de exoesqueleto

La selección de materiales se seleccionó en base a los requerimientos anteriormente mencionados teniendo en cuenta los costos de adquisición de esta, también es muy importante ya que depende mucho para el funcionamiento, la ergonomía y funcionamiento del prototipo.

También para la selección de materiales hay que usar el criterio en base a varias propiedades tanto estructurales como generales, según su importancia y esas características requeridas en el planteamiento del proyecto que son:

- Alta resistencia
- Peso liviano
- Fácil mecanización y trabajo
- Alta durabilidad

Estas últimas características también concuerdan con el estudio anterior del exoesqueleto.

4.3.1 Selección del material para la cadera y la grúa móvil de rehabilitación (estructura de cargas) del exoesqueleto y paciente

Como el mecanismo de cadera y la grúa de rehabilitación debe soportar cargas del exoesqueleto, del paciente y demás componentes que conforman el conjunto de exoesqueleto por lo tanto el material que se encuentra a disposición en el mercado, la relación de costos/beneficios y también la fácil construcción de esta, se llegó a usar tubos de acero estructural con las respectivas dimensiones.

4.3.1.1 Acero estructural

- Descripción. Estos aceros presentan un campo de aplicaciones muy amplio. Además de satisfacer los requisitos de las normas americanas., también cumplen muchas de las especificaciones analíticas incluidas en las normas europeas. Es un material muy utilizado para la construcción de estructuras mecánicas que requieran importante resistencia mecánica y soldabilidad, sus elementos aleantes le brindan características muy especiales. (Sumiteccr, 2017)
- Normas involucradas: ASTM A 992/A 992 M
- Propiedades mecánicas:
Esfuerzo a la fluencia mínimo: 345 MPa
Esfuerzo a la tensión: 450 MPa.
Elongación mínima en 50 mm (2"): 21%
- Propiedades físicas: Densidad 7.85 g/cm^3 (0.284 lb/in^3)

4.3.1.2 Tubo estructural rectangular y cuadrado negro

Los Tubos de acero estructural cuya norma de fabricación NTE INEN 2415 cuya calidad es ASTM A-500- SAE J 403 1008.

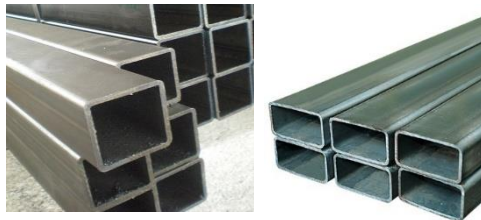


Figura 5-4: Tubo estructural rectangular y cuadrado negro

Fuente: <http://www.dipacmanta.com/tubos/tubo-estructural-rectangular-negro>

4.3.1.3 Tubo estructural redondo negro

Los Tubo de acero estructural cuya norma de fabricación NTE INEN 2415, cuya calidad es ASTM A-500- SAE J 403 1008.



Figura 6-4: Tubo estructural redondo negro

Fuente: <http://www.dipacmanta.com/tubos/tubo-estructural-redondo-negro>

4.3.2 Selección del material para el exoesqueleto

Para la construcción de los eslabones femorales, tibiales y tobillo se necesita un balance de peso y resistencia. Una aleación de metal es lo más usado en los exoesqueletos actuales del mercado es más la aleación que se designó para la construcción del exoesqueleto del estudio anterior fue aluminio aeronáutico 2024T4 (o duraluminio), pero el material es muy elevado en costos y es muy difícil de encontrar en el mercado, tomando en cuenta que al ensamblar tendría un peso considerable y agregado el peso de los motores es difícil conseguir el toque necesario que solventen las necesidades de cargas para la simulación del prototipo.

En el nuevo rediseño de los eslabones, las articulaciones de cadera, de rodilla, tobillos, pie, se aplicó lo antes mencionado con el fin de brindar un mejor soporte, seguridad, reducir los costos de manufactura, reducir el peso y tomando en cuenta su fácil manufactura, el material elegido es un termoplástico obtenido a partir de Poliamida 6 denominado GRILON.

4.3.2.1 Grilon / Nailon

Es uno de los polímeros más comunes es su uso. Se denomina técnicamente poliamidas, por los grupos amida en su cadena principal. Todas las poliamidas absorben agua con el tiempo, por lo que se requiere tener cuidado en las medidas finales de las piezas y dejar las tolerancias adecuadas.

La velocidad lineal de deslizamiento sin lubricación no debe ser mas de 2m/ s. Existen poliamidas que pueden estar mezcladas con grafito, aceite, bisulfuro de molibdeno, etc. que pueden mejorar el resultado al deslizamiento. Tiene las siguientes características:

Características del nailon:

- Poliamida obtenida por extrusión. Color del producto: blanco.
- Muy buena resistencia mecánica.
- Buena resistencia a la fatiga y al desgaste.
- Buenas propiedades mecánicas y dieléctricas.
- Buena resistencia a los agentes químicos. No se puede utilizar con ácidos en concentraciones de más del 1%, ni estar en contacto con metanol, etanol, alcohol bencílico, fenol; entre otros.
- Absorbe humedad, lo cual debe tenerse en cuenta en el cálculo de los elementos mecánicos que requieran tolerancias (ejes, engranajes, etc.).
- Sus nombres comerciales más comunes son: Grilon, Nilón, Ertalon, Sustamid, etc. (2017)

Tabla 2-4: Propiedades mecánicas del grilon

POLIAMIDA 6 (GRILON) (HUMEDAD 2,5%)				
PROPIEDADES MECÁNICAS A 23°C	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
Peso específico	gr/cm ³	D-792	53479	1.14
Resistencia a la tracción. (fluencia / rotura)	Kg/cm ²	D-638	53455	450 / --
Res. a la compresión (1 y 2 % def)	Kg/cm ²	D-695	53454	150 / 280
Resistencia a la flexión	Kg/cm ²	D-790	53452	400
Res. al choque sin entalla	Kg.cm/cm ²	D-256	53453	NO ROMPE
Alargamiento a la rotura	%	D-638	53455	200
Módulo de elasticidad (tracción)	Kg/cm ²	D-638	53457	14000
Dureza	Shore D	D-2240	53505	72 - 76
Coef. de roce estático s/acero		D-1894		0.31 a 0.54
Coef. de roce dinámico s/acero		D-1894		0.27 a 0.43
Res. al desgaste por roce				BUENA

Fuente: <http://www.jq.com.ar/Imagenes/Productos/Poliamida6/Poliam6/dtecnicos.htm>.

Tabla 3-4: Propiedades térmicas del grilon

PROPIEDADES TÉRMICAS	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
Calor específico.	Kcal/Kg. °C	C-351		0.4
Temp. de flex. b/carga (18.5kg/cm²).	°C	D-648	53461	70
Temp. de uso continuo en aire.	°C			-40 a 90
Temp. de fusión.	°C			220
Coef. de dilatación lineal de 23 a 100°C.	por °C	D-696	52752	0.000105
Coef. de conducción térmica.	Kcal/m.h. °C	C-177	52612	0.23

Fuente: <http://www.jq.com.ar/Imagenes/Productos/Poliamida6/Poliam6/dtecnicos.htm>.

4.3.3 Selección de materiales para los demás componentes que conforman el conjunto de exoesqueleto

Existen componentes adicionales que conforman el exoesqueleto y por ende también fueron diseñados, fabricados y ensamblados por lo tanto se debe mencionar los materiales de los componentes que son mencionados a continuación.

4.3.3.1 Ejes

El material seleccionado para mecanizar los ejes, encargados de transmitir la potencia y el movimiento de rotación los motores a los eslabones del prototipo de exoesqueleto.

Es una varilla de acero negro de forma circular lisa de calidad ASTM A36, es seleccionada por su fácil mecanización y resistencia mecánica en estructuras fuertes y confiables tomando en cuenta que los 6 ejes no van a estar sometidos a fatiga, altas temperaturas ni altas revoluciones.



Figura 7-4: Varilla circular lisa de acero negro

Fuente: <http://www.dipacmanta.com/perfiles/perfiles-laminados/varilla-redonda>

4.3.3.2 Chavetas

El material seleccionado para mecanizar las chavetas fue una platina de perfil laminado acero negro con norma de fabricación NTE INEN 115 y su calidad ASTM A 36 - SAE J 403 1008, es seleccionada por que la función de esta es entrar en el agujero (chavetero) del eje para que impida deslizamientos de una pieza de la otra.



Figura 8-4: Platina de acero negro

Fuente: <http://www.dipacmanta.com/perfiles/platinas>

4.4 Análisis de los torques estáticos

Torque de cadera

$$\begin{aligned} & \text{Longitud_cadera_rodilla} * (\text{Masa_motor_rodilla} + \text{Masa_barra_muslo} + \text{Masa_muslo}) + \\ & \text{Longitud_rodilla_tobillo} * (\text{Masa_motor_tobillo} + \text{Masa_barra_pantorila} + \text{Masa_pantorilla}) + \\ & \text{Longitud_tobillo_pie} * (\text{Masa_barra_pie} + \text{Masa_pie}) = 7,076 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Torque de rodilla

$$\begin{aligned} & \text{Longitud_rodilla_tobillo} * (\text{Masa_motor_tobillo} + \text{Masa_barra_pantorila} + \text{Masa_pantorilla}) + \\ & \text{Longitud_tobillo_pie} * (\text{Masa_barra_pie} + \text{Masa_pie}) = 2,61 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Torque de tobillo

$$\text{Longitud_tobillo_pie} * (\text{Masa_barra_pie} + \text{Masa_pie}) = 0,196 \text{ Nm}$$

Tabla 4-4: Datos del prototipo

Longitud_cadera_rodilla	0,37 m
Longitud_rodilla tobillo	0,36 m
Longitud_tobillo_pie	0,08 m
Masa_motor_rodilla	0,70 kg
Masa_motor_tobillo	0,28 kg
Masa_barra_muslo	0,22 kg
Masa_barra_pantorilla	0,21 kg
Masa_barra_pie	0,08 kg
Masa_muslo	0,26 kg
Masa_pantorilla	0,25 kg
Masa_pie	0,17 kg

Fuente: Autor

4.5 Análisis dinámico de torques del exoesqueleto para la selección del motor en el software ADAMS VIEW

Para este análisis se parte de un modelado en SolidWorks un diseño de la pierna del exoesqueleto y trasladando en formato. IGS al ADAMS VIEW con el objetivo de analizar los torques que se presenta en cada una de las articulaciones del exoesqueleto.

Una vez importado la modelación se colocan los parámetros para la simulación, es decir se asigna las conexiones en las articulaciones, las respectivas uniones entre partes de los componentes que componen la pierna, el respectivo material en este caso la densidad del material, y los pesos de los motores para el movimiento más crítico de la pierna.

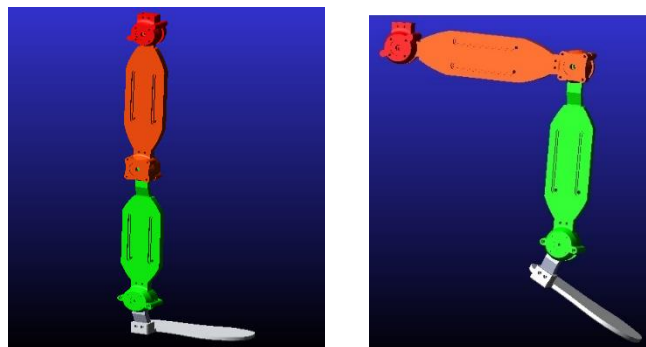


Figura 9-4: Posición inicial Posición Final crítica

Fuente: Autor, MSC. ADAMS

4.5.1 Asignación de material en Adams View

En este caso en el programa no está el material por defecto así que se optó por ingresar la densidad.

- Densidad nilón: 1150 kg/m³ este caso $1.15 \times 10^{-3} \frac{g}{mm^3}$.

4.5.2 Conexiones de revolución y asignación de pesos de los motores

Se asigna las conexiones en las articulaciones en cadera, rodilla y tobillo, de la pierna con sus respectivos ejes de rotación y seguidamente los motores programados con step, después se coloca un peso aproximado de los motores que aparentemente pueden ser seleccionados en las articulaciones.

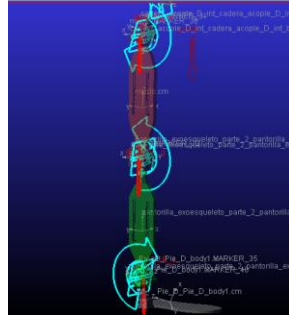


Figura 10-4: Conectores y asignación de fuerzas

Fuente: Autor, MSC. ADAMS

4.5.2.1 Cadera

Parámetros:

- Peso aproximado del motor = 13.72 N
- Conexión de rotación
- Motor: STEP (time, 0, 0, 5, 90d)

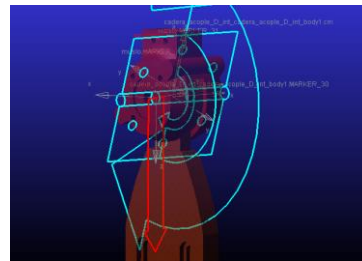
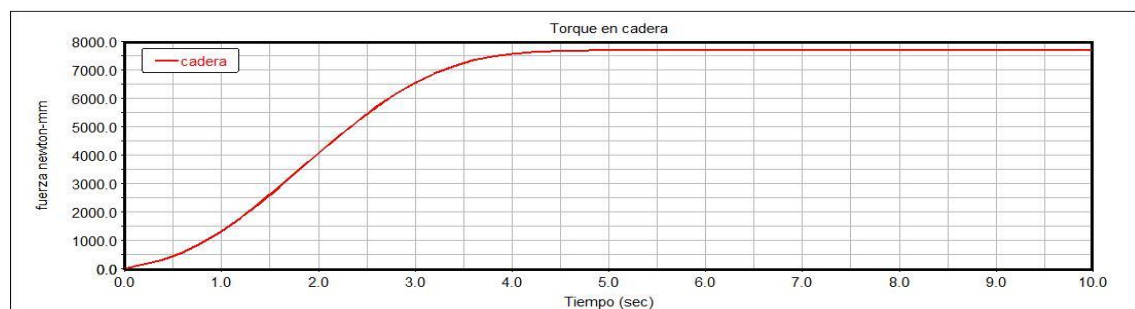


Figura 11-4: Parámetros asignados cadera

Fuente: Autor, MSC. ADAMS

Torque en la articulación de cadera.

Los torques máximos se obtienen de la gráfica Tiempo-Torque obtenidas de ADAMS VIEW. Para el diseño se requiere el valor máximo en la cadera de 7680.9 N-mm aproximadamente 7.6 N-m que se genera al momento de realizar el movimiento más crítico de la pierna



Gráfica 1-4: Torque en articulación de cadera

Fuente: Autor, MSC. ADAMS

4.5.2.2 Rodilla

Parámetros:

- Peso aproximado del motor = 6.84 N
- Conexión de rotación
- Motor: STEP (time, 0, 0, 5, 90d)

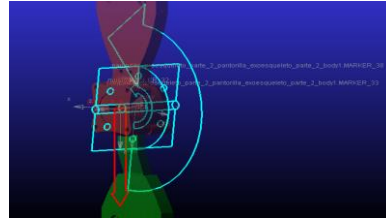
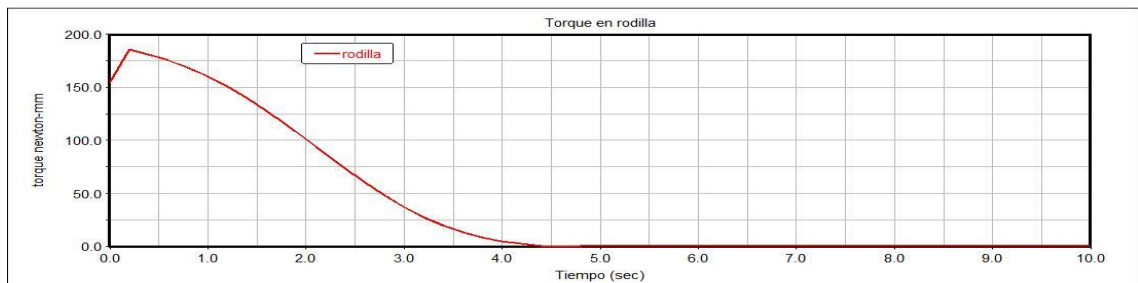


Figura 12-4: Parámetros asignados rodilla

Fuente: Autor, MSC. ADAMS

- *Torque en la articulación de rodilla*

Los torques máximos se obtienen de la gráfica Tiempo-Torque obtenidas de ADAMS VIEW. Para el diseño se requiere el valor máximo en la rodilla de 185.41 N-mm aproximadamente 0.15 N-m que se genera al momento de realizar el movimiento más crítico de la pierna.



Gráfica 2-4: Torque en articulación de rodilla

Fuente: Autor, MSC. ADAMS

4.5.2.3 Tobillo

Parámetros:

- Peso aproximado del motor = 2.74 N
- Conexión de rotación
- Motor: STEP (time, 0, 0, 5, -30d)

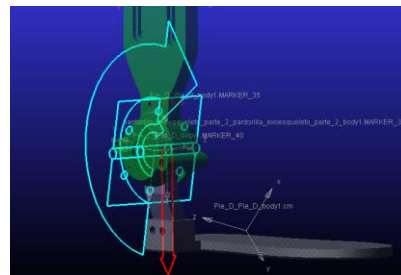
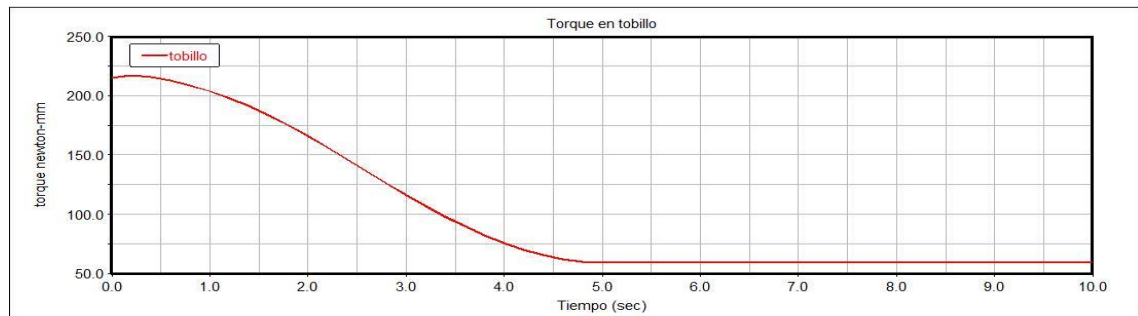


Figura 13-4: Parámetros asignados rodilla

Fuente: Autor, MSC. ADAMS

- *Torque en la articulación de tobillo*

Los torques máximos se obtienen de la gráfica Tiempo-Torque obtenidas de ADAMS VIEW. Para el diseño se requiere el valor máximo en el tobillo de 215.24 N-mm aproximadamente 0.215 N-m que se genera al momento de realizar el movimiento más crítico de la pierna.






Gráfica 3-4: Torque en articulación de tobillo

Fuente: Autor, MSC. ADAMS

4.5.3 Selección de actuadores

Para la selección de los 6 motores se realizaron para un exoesqueleto en vacío, debido a que no se toma en cuenta el peso de las extremidades del paciente ni su tipo de discapacidad. Se contempla también la necesidad ergonómica, adaptable a la estructura del exoesqueleto con la facilidad de instalación, durabilidad y fácil de encontrar en el mercado.

Tabla 5-4: Tabla de torques y selección de los actuadores

Articulación	Motor	Figura	Torques motor	Torques dinámicos calculados	Torques estáticos calculados
Cadera	Nema 23 Gearbox 15.1		1,25 N-m	7.6 N-m	7.076 N-m
Rodilla	Nema 23		0,90 N-m	0.15 N-m	2,61 N-m
Tobillo	Nema 17		0,25 N-m	0.215 N-m	0.196 N-m

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

4.5.3.1 Motor de elevación del paciente situado en la grúa móvil de rehabilitación

Este motor tiene que elevar una carga aproximada de 80 kg y para que sea un mecanismo cabrestante controlado por un mando se seleccionó una Wincha Tecle Eléctrico Hoist 250kg/ 500lb

Las características de este son:

- Protección tipo IP40
- Aislamiento tipo B
- Grupo de mecanismos M1
- Voltaje: 110/120V ~ 60Hz
- Intensidad: 8.5A
- Potencia: 1000W
- Capacidad de levantamiento: 550lb. (una-línea), 1100lb. (Doble-línea)
- Capacidad de levantamiento altura: 11.58m (una-línea), 5.7779m (Doble-línea)
- Velocidad de levantamiento: 0.167m/s (una-línea), 0.081m/s (Doble-línea).
- Diámetro del cable: 0.43cm
- Tensión máxima del cable: 1770N/mm^2 (2017)



Figura 14-4: Wincha y tecla

Fuente: https://www.google.com.ec/search?q=Wincha+Tecle+El%C3%A9ctrico+Hoist+250+kg/+500+lb.&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjOobjxmKzZAhUENd8KHxJNDFoQ_AUICigB&biw=1366&bih=588#imgrc=udlmYva6unKScM

4.6 Selección de los procesos de manufactura

En la fabricación de un producto se debe tener en cuenta las variables del material como: las propiedades fisicoquímicas y mecánicas necesarias del material, el lugar en donde se va a fabricar, si es capaz de procesarse en la forma deseada, si se ajusta con los requerimientos del diseño, si es partidario con el medio ambiente y si es factible económicamente, para esto el ingeniero debe seleccionar una metodología que le permita evaluar que material es adecuado a cada tipo de proceso de producción puesto que no cualquier proceso es compatible con el material deseado. El desconocimiento y falta de familiaridad con la maquinaria puede llevar a tomar decisiones equivocadas, como una mala inversión en máquinas, personal y materiales

4.6.1 *Procesos de manufactura*

Para manufacturar una pieza existen diferentes procesos o métodos para obtener el producto deseado, los procesos de producción tienen variables en común como lo son: materiales, tiempo de fabricación, maquinaria, cantidad, costos, entre otras ya que cada proceso de manufactura tiene diferentes formas de procesar el material para llegar al producto final, lo que hace imposible estandarizar criterios generales para todos los procesos de manufactura. (Kalpakjian, y otros, 2008)

Según (Kalpakjian, y otros, 2008), resume la elección de un proceso de manufactura por varios aspectos

- Las propiedades y características del material de la pieza a fabricar.
- La forma, tamaño y espesor de la pieza
- La tolerancia dimensional y acabado superficial. ·
- La cantidad de producción.
- El nivel de automatización necesarios para cumplir con el volumen y la rapidez de producción.
- Los costos individuales y de la operación de manufactura.

Tomando en cuenta todos estos procesos otros puntos muy importantes son la maquinaria que se va a utilizar, analizar qué tan compleja es la forma de la pieza y el impacto ambiental que puede generar escoger uno u otro proceso de manufactura. Todos los materiales que se encuentran en la industria son diferentes entre sí, algunos son fáciles de trabajar por ser suaves y dúctiles, otros porque son duros, frágiles y abrasivos, por lo cual, cada uno requiere técnicas especiales de procesamiento.

Los procesos de manufactura se pueden clasificar de diferentes formas dependiendo de las necesidades del diseñador y fabricante, para este caso se propone la siguiente clasificación de procesos de manufactura.

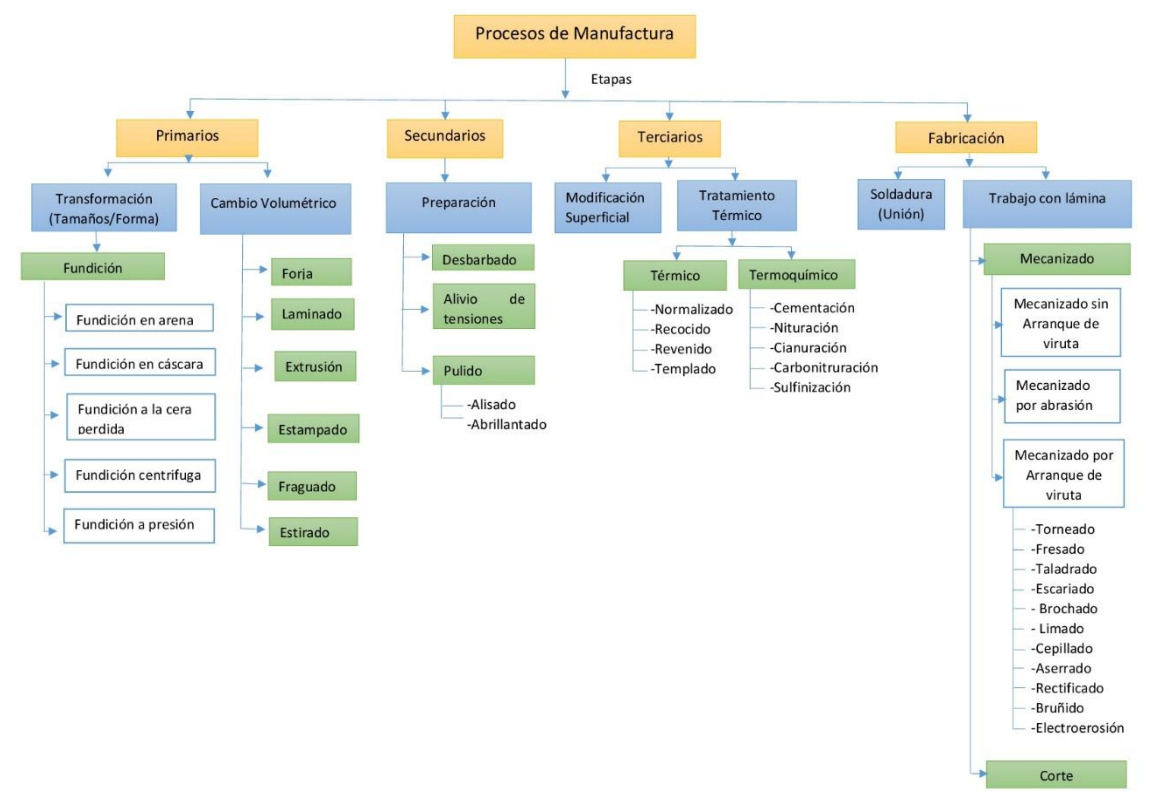


Figura 15-4: Clasificación de todos los procesos de producción
Fuente: Autor

4.7 El proceso de mecanizado

El proceso más extendido en la industria es el mecanizado, en especial el mecanizado por arranque de viruta y comparado con otros métodos de fabricación se pueden tener las siguientes ventajas y desventajas respecto a los demás procesos de producción, sobre todo respecto a los de conformado por deformación plástica y los de fundición:

Tabla 6-4: Ventajas y Desventajas del mecanizado frente a otros procesos

Ventajas	Desventajas
Se consigue una alta precisión dimensional de sus operaciones.	Genera material de desecho en muchos casos no reciclable.
Pueden realizar una amplia variedad de formas	Requieren una mayor energía de proceso.
No cambia la microestructura del material por lo que se conserva sus propiedades mecánicas.	Los tiempos de producción son elevados.

Se consigue texturas superficiales convenientes para los distintos diseños.	El tamaño de las piezas está limitado al permitido por la máquina herramienta.
Son procesos fáciles de automatizar siendo muy flexibles.	Suelen ser poco económicos cuando el tamaño de lote es muy elevado.
Requiere poco tiempo de preparación.	
Poca variedad de herramienta.	

Realizado por: Joel Lliguay 2018
Fuente: Autor

4.8 Variables fundamentales de un proceso de manufactura

Como se ha venido mencionado, la selección de un proceso de manufactura es un trabajo muy complejo que se debe tomar en cuenta todos los factores que intervienen, independientemente del tipo de pieza que se desee manufacturar para ello existen criterios generales que aplican para todas; tales como los requerimientos de diseño, las especificaciones de funcionamiento, los materiales, la forma etc., que afectan directamente el proceso.

En el proceso de maquinado existen variables que son independientes y que no afectan de forma directa, pero se deben tener en cuenta, y a su vez existen factores que intervienen directamente en el proceso de maquinado y para ello se resume en la tabla. (Kalpakjian, y otros, 2008)

Las variables independientes principales en los procesos son:

- Material, recubrimientos y estado de la herramienta
- Forma
- Material, estado y temperatura de la pieza
- Fluidos de corte
- Características de la máquina herramienta, como por ejemplo rigidez y amortiguamiento
- Sujeción y soporte de la pieza

Las variables dependientes que influyen por cambios de las variables independientes son:

- Tipo de viruta producida
- Fuerza y energía disipadas en el proceso
- Aumento de temperatura en la pieza, la viruta y la herramienta
- Desgaste y falla de la herramienta
- Acabado superficial producida en la pieza después de maquinarla

(Kalpakjian, y otros, 2008)

Tabla 7-4: Factores que influyen en el proceso de mecanizado

Factores que influyen en las operaciones de maquinado	
Parámetro	Influencia y relación
Velocidad de corte, profundidad de corte, avance, fluidos de corte	Fuerzas, potencia, elevación de temperatura, vida útil de la herramienta, tipo de viruta, acabado e integridad superficial.
Ángulos de la herramienta	Igual que en el párrafo anterior; influencia en la dirección de flujo de la viruta; resistencia al desgaste y astillado de la herramienta.
Viruta continua	Buen acabado superficial; fuerzas estables de corte; indeseable, en particular en la maquinaria automatizada.
Viruta de borde acumulado o recrecido	Acabado e integridad superficial deficientes; si es delgada y estable, el borde acumulado puede proteger las superficies de la herramienta.
Viruta discontinua	Deseable para facilitar la disposición de la viruta; fuerzas fluctuantes de corte; puede afectar el acabado superficial y provocar vibración y traqueteo.
Elevación de la temperatura	Influye en la vida útil de la herramienta, en particular en la craterización y en la precisión dimensional de la pieza de trabajo; puede provocar daño térmico a la superficie de la pieza de trabajo.
Desgaste de la herramienta	Influye en el acabado e integridad superficial, la precisión dimensional, la elevación de la temperatura, las fuerzas y la potencia.
Maquinabilidad	Relacionada con la vida útil de la herramienta, el acabado superficial, las fuerzas y la potencia y el tipo de viruta.

Fuente: Kalpakjian, Serope y Schmid, Steven. 2008. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Mexico : PEARSON EDUCACIÓN, 2008. Vol. V. ISBN: 978-970-26-1026-7 pág. 610.

Mencionado lo anterior se puede concluir que un proceso de mecanizado tiene una gran relación con las variables independientes, es difícil pensar que cada variable actúa de manera independiente puesto que la alteración de una lleva consecuencias al comportamiento de otras.

Para este proyecto se clasificarán desde otro punto de vista estas variables y para demostrar lo antes mencionado la clasificación sería en variables fundamentales para el proceso de mecanizado y en parámetros que se debe tener en cuenta en el proceso de mecanizado.

4.8.1 Variables fundamentales

Para los diferentes tipos de procesos de mecanizado existe la posibilidad de seleccionar de entre un rango de valores ya establecidos en tablas recomendados por (Kalpakjian, y otros, 2008) y entre estas variables fundamentales están:

- Forma
- Tolerancia
- Rugosidad
- Tamaño
- Material de la herramienta

4.8.1.1 Forma

El proceso de mecanizado ofrece a la pieza a mecanizar, dar una forma o característica que se requiere, desde una forma simple hasta muy compleja y para lograr eso se realiza con su respectivo método de producción en las cuales se resumen en la siguiente tabla a continuación. (Kalpakjian, y otros, 2008)

Tabla 8-4: Formas y algunos métodos comunes de producción

Forma o característica	Método de producción
Superficies planas	Laminado, cepillado, brochado, fresado, formado, esmerilado
Piezas con cavidades	Fresado de acabado, maquinado por descarga eléctrica, maquinado electroquímico, maquinado ultrasónico, fundición
Piezas con características agudas	Fundición de molde permanente, maquinado, esmerilado, metalurgia de polvos
Formas huecas delgadas	Fundición en cascara, electroformado
Formas tubulares	Extrusión, estirado, formado por rodillos, girado, fundición centrífuga
Piezas tubulares	Formado con hule, expansión con precisión hidráulica, formado explosivo, rechazado
Curvatura en laminas delgadas	Formado estirado, formado por golpeado, ensamble
Aperturas en hojas delgadas	Troquelado, troquelado químico, troquelado foto químico
Secciones transversales	Estirado, extruido, cepillado de acabado, torneado, esmerilado o rectificado sin centros
Bordes a escuadra	Troquelado fino, maquinado, rasurado, esmerilado con banda
Pequeños orificios	Láser, electroerosión maquinado, maquinado electroquímico
Texturas superficiales	Moldeado, cepillado con alambre, esmerilado, esmerilado con banda, granalla de acero, grabado, deposición
Características detalladas de las superficies	Acuñado, fundición a la cera perdida, fundición en molde permanente, maquinado
Partes roscadas	Corte de roscas, laminado de roscas, esmerilado de roscas, bruñido
Piezas muy grandes	Fundición, forja, ensamble
Piezas muy pequeñas	Fundición a la cera perdida, maquinado, grabado, metalurgia de polvos, nanofabricación, micro maquinado

Fuente: Kalpakjian, Serope y Schmid, Steven. 2008. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Mexico : PEARSON EDUCACIÓN, 2008. Vol. V. ISBN: 978-970-26-1026-7 pág. 610.

Al momento de mecanizar la pieza diseñada se tiene formas y tamaños diferentes, el material seleccionado se adquiere en el mercado y por lo común se encuentra en planchas y barras comerciales, las cuales son hechas en formas estándar y en diferentes tamaños en base a esas condiciones empieza a regirse el método de producción. Y por eso se selecciona una barra que tenga una forma similar a la pieza, con el fin de no desperdiciar material y no se aumente el costo de compra y de mecanización se resumen las formas y el tipo de mecanización en la tabla (Kalpakjian, y otros, 2008)

Tabla 9-4: Formas que se pueden producir en el mecanizado

Formas a producir	Proceso capaz de mecanizarlo
Redonda	Torneado, Taladrado, Rectificado.
Plana	Cepillado, Brochado, Fresado, Aserrado, Rectificado.
Diversas	Fresado, Cepillado, Brochado, Aserrado, Fresado

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

4.8.1.2 Tolerancia

En la fabricación de una pieza se busca admitir un margen para las imperfecciones en la manufactura del componente ya que es imposible la precisión absoluta desde el punto de vista técnico entonces se busca la necesidad de fabricar piezas más precisas. En el mundo del mecanizado es imposible fabricar dos piezas que tengan exactamente las mismas dimensiones, ya sea por factores presentes por un proceso de manufactura inadecuado o por variaciones en las máquinas o en los materiales, etc. Las tolerancias ayudan a generar piezas estandarizadas para acoplarse entre una con otras y ensamblar, y sustituir piezas que se han producido fallas y cumplan con sus características también hay que aclarar que cuanto menor sea el margen de tolerancia, la pieza será más difícil de producir y por lo tanto más costosa.

La tolerancia busca cada vez más la perfección en sus procesos y productos, con mayor calidad y menores precios. Existen dos tipos de tolerancias:

- *Tolerancias dimensionales*

Es la variación permisible en las dimensiones de la pieza en el ancho, alto profundidad, ángulos, diámetros de una parte de la misma. La tolerancia dimensional es la cantidad total que es permitido variar en la fabricación, a una dimensión especificada en el plano según la cota nominal en un límite superior y otro inferior, que deben estar las piezas.

- *Tolerancia geométrica*

Las tolerancias geométricas están relacionadas directamente en la forma y la geometría de la pieza, puesto que no es suficiente en algunos casos especificar solo con las tolerancias dimensionales. En determinadas ocasiones como, por ejemplo: mecanismos muy precisos, piezas de grandes dimensiones, etc., la especificación de tolerancias dimensionales puede no ser suficiente para asegurar un correcto montaje y funcionamiento de los mecanismos. (2018)

Es importante asegurar el correcto montaje y funcionamiento de los mecanismos, se verifica que la pieza cumpla con especificaciones y características de rectitud, planicidad, redondez, cilindricidad, paralelismo, perpendicularidad, inclinación, concentricidad, posición, oscilación circular radial, axial o total. (2018). En la figura siguiente se muestran tres casos, donde una de las piezas puede ser correcta desde el punto de vista dimensional.



Figura 16-4: Irregularidades geométricas

Fuente: UNE1121. slideshare. [En línea] [Citado el: 5 de marzo de 2018.] https://es.slideshare.net/aicvigo1973/tolerancias-geometricas?from_action=save.

En el primer caso tendríamos un defecto de rectitud, en el segundo caso tendríamos un defecto de casualidad, y en el tercer caso tendríamos un defecto de perpendicularidad esto sucede que en la fabricación se producen irregularidades geométricas que pueden afectar a la forma, posición y orientación de los diferentes elementos constructivos de las piezas. (2018). Según la norma UNE 1121, los símbolos utilizados para la indicación de tolerancias geométricas son:

TIPO DE TOLERANCIA	CARACTERÍSTICAS	SÍMBOLO
Forma	Rectitud	—
	Planicidad	▭
	Redondez	○
	Cilindricidad	⊘
	Forma de una línea	⌒
	Forma de una superficie	⌒
Orientación	Paralelismo	//
	Perpendicularidad	⊥
	Inclinación	∠
Situación	Posición	⊕
	Concentricidad y Coaxialidad	⊙
	Simetría	≡
Oscilación	Circular	↗
	Total	↗↗

Figura 17-4: Tolerancias geométricas

Fuente: UNE1121. slideshare. [En línea] [Citado el: 5 de marzo de 2018.] https://es.slideshare.net/aicvigo1973/tolerancias-geometricas?from_action=save.

Aclarando los dos diferentes tipos de tolerancias para el presente trabajo solo se tendrá en cuenta la tolerancia dimensional puesto que verificar el cumplimiento de la tolerancia geométrica requiere medios metrológicos y métodos de medición dificultosas que en este caso no se aplicará.

La tolerancia dimensional, influye en los costos de maquinado y en la gráfica que muestra (Kalpakjian, y otros, 2008), compara el tamaño de la parte para diversos procesos de manufactura con la tolerancia permisible, se puede observar que, debido a los muchos factores comprendidos, existe un amplio intervalo para las tolerancias.

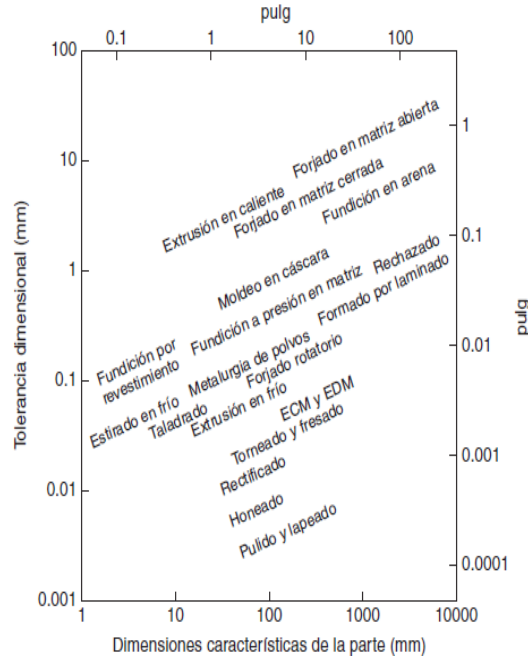


Figura 18-4: Tolerancias dimensionales en función del tamaño de la parte para diversos procesos de manufactura

Fuente: Kalpakjian, Serope y Schmid, Steven. 2008. Manufactura, ingeniería y tecnología. México : PEARSON EDUCACIÓN, 2008. Vol. V. ISBN: 978-970-26-1026-7 pág. 1104.

En resumen, esto se puede facilitar en una tabla donde indica el proceso, las características y las tolerancias dimensionales promedio con valores actuales en el mundo del mecanizado que propone el autor. (Kalpakjian, y otros, 2008)

Tabla 10-4: Características generales de los procesos de maquinado y tolerancias dimensionales características

Proceso	Características	Tolerancias dimensionales características, \pm mm (pulgadas)
Torneado	Operaciones de torneado y careado (refrentado) en todos los tipos de materiales, utiliza herramientas de una sola punta o de forma, los tornos mecánicos requieren mano de obra experta, baja velocidad de producción (pero velocidad media a alta con tornos de torreta y máquinas automáticas) que requiere mano de obra menos experta.	Fino: 0.025–0.13 (0.001–0.005) Bastor: 0.13 (0.005)
Mandrinado	Superficies o perfiles internos con características similares al torneado, es importante la rigidez de la barra para mandrinar para evitar traqueteo.	0.025 (0.001)
Taladrado	Orificios redondos de varios tamaños y profundidades, alta velocidad de producción, la mano de obra calificada se requiere dependiendo de la ubicación de los orificios y la precisión especificada, requiere mandrinado y escariado para mejorar precisión.	0.075 (0.003)
Fresado	Gran variedad de formas que comprenden contornos, superficies planas y ranuras; versátil; velocidad de producción baja a media; requiere mano de obra calificada.	0.13–0.25 (0.005–0.01)
Planeado	Superficies planas grandes y perfiles de contornos rectos en piezas de trabajo largas, producción de bajas cantidades, la mano de obra calificada se requiere dependiendo de la forma de la parte.	0.08–0.13 (0.003–0.005)
Cepillado de mesa fija	Superficies planas y perfiles de contornos rectos en piezas de trabajo relativamente pequeñas, producción de bajas cantidades, la mano de obra calificada se requiere dependiendo de la forma de la parte.	0.05–0.13 (0.002–0.003)
Brochado	Superficies internas y externas, ranuras y contornos; buen acabado superficial; herramientas costosas; alta velocidad de producción; la mano de obra calificada se requiere dependiendo de la forma de la parte.	0.025–0.15
Aserrado	Cortes rectos y de contornos en formas planas o estructurales; no adecuado para materiales duros, a menos que la sierra tenga dientes de carburo o estén recubiertos con diamante, baja velocidad de producción, por lo general se requiere mano de obra poco calificada.	0.8

Fuente: Kalpakjian, Serope y Schmid, Steven. 2008. Manufactura, ingeniería y tecnología. México : PEARSON EDUCACIÓN, 2008. Vol. V. ISBN: 978-970-26-1026-7 pág. 1104.

4.8.1.3 Rugosidad

La rugosidad es más comúnmente conocida como la altura de la depresión más profunda hasta la cresta más elevada es decir desviaciones cercanas e irregulares en pequeña escala espaciadas estrechamente, esto indica la cantidad de material que tiene que devastarse para llegar a una superficie lisa. La unidad de medida es en micrómetro (μm) o en micro pulgadas (μin) la rugosidad superficial se expresa en términos de su peso, anchura y distancia a lo largo de la superficie.

En la siguiente figura se muestra la medición y los diferentes perfiles de rugosidad que e comportan en diferentes procesos, para la medición de la rugosidad se utilizan instrumentos conocidos como rugosímetros superficiales.

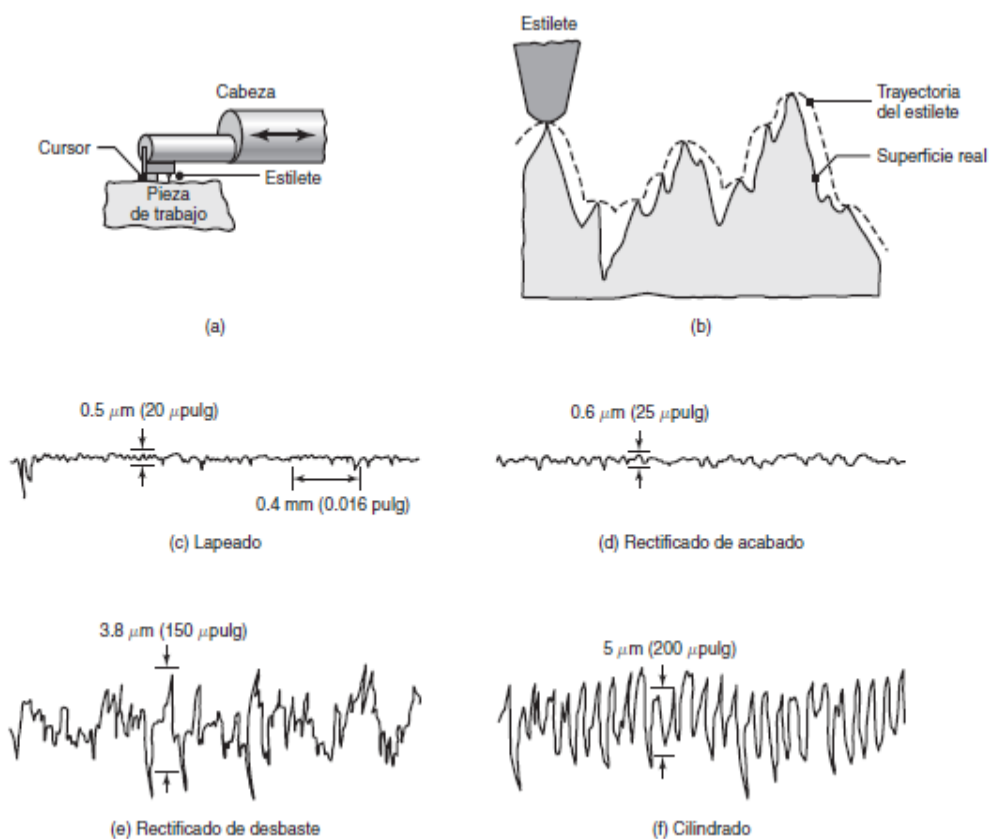


Figura 19-4: (a) Medición de la rugosidad superficial con un estilete. El cursor soporta el estilete y lo protege contra daños. (b) Trayectoria del estilete en mediciones de rugosidad superficial (línea punteada), en comparación con el perfil real de rugosidad. Obsérvese que el perfil de la trayectoria del estilete es más liso que el de la superficie real. (c) a (f) Perfiles superficiales comunes producidos por diversos procesos de maquinado y acabado superficial. Nótese la diferencia entre las escalas verticales y horizontales.

Fuente: Kalpakjian, Serope y Schmid, Steven. 2008. Manufactura, ingeniería y tecnología. México: PEARSON EDUCACIÓN, 2008. Vol. V. ISBN: 978-970-26-1026-7 pág. 1041.

Según (Kalpakjian, y otros, 2008) propone una tabla donde se muestra el proceso con su respectivo rango de rugosidad y clase para su mejor selección en la construcción del proyecto.

Tabla 11-4: Rango de rugosidad de los procesos de mecanizado

Proceso	Rango de rugosidad propuesto (μm)	Clase de rugosidad
Torneado	0.8 – 6.3	N6 – N9
Taladrado	3.2 – 6.3	N8 – N9
Fresado	1.6 – 6.3	N7 – N9
Cepillado	3.2 – 12.5	N8 – N10
Rectificado	0.20 – 1.6	N1 – N7
Brochado	1.6 – 3.2	N1 – N8
Aserrado	3.2 – 25	N8 – N11

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Kalpakjian, Serope y Schmid, Steven. 2008. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Mexico : PEARSON EDUCACIÓN, 2008. Vol. V. ISBN: 978-970-26-1026-7 pág 1414.

4.8.1.4 Tamaño

El tamaño de la pieza a mecanizar es un factor importante a la hora de ejecutar el proceso indicado. El operador debe saber elegir el proceso con respecto a las dimensiones de la pieza, es decir al momento de mecanizar una pieza de pequeñas dimensiones se opte por un proceso que tiene capacidad para piezas grandes como por ejemplo en el proceso de cepillado al cometer ese error tal vez se consiga el objetivo, pero no en su totalidad sin tomar en cuenta que la máquina desperdicio energía, recursos y haría que los costos aumentaran significativamente. Otra de las características del tamaño de maquinar una pieza, cada proceso se define de forma diferente, dependiendo de la herramienta de corte que cada uno utiliza. Y gracias a eso (Kalpakjian, y otros, 2008) detalla tablas para cada proceso es decir para el taladrado, torneado etc., pero a continuación se presenta una tabla con rangos de medida aproximada de tamaños dependiendo del proceso que facilitará en este proyecto.

Tabla 12-4: Rango de tamaños de los procesos de mecanizado

Proceso	Rangos de medida aproximada	Valor promedio
Torneado	0.02 – 1 m	0.51 -1.0 m
	0.3 – 1 m	0.65 m -0.6 m
Taladrado	0.1 – 4 m	2.02 -2.0 m
Fresado	0.02 – 1 m	0.51 -0.5 m
Cepillado	1 – 15 m	8.0 -8.0 m
Rectificado	1 – 2 m	1.5 -1.0 m
Brochado	2 – 15 m	8.5 -8.0 m
Aserrado	1 -2 m	1.5 -1.0 m

Fuente: Kalpakjian, Serope y Schmid, Steven. 2008. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Mexico : PEARSON EDUCACIÓN, 2008. Vol. V. ISBN: 978-970-26-1026-7 pág 111.

4.8.1.5 Material de la herramienta

Cuando se selecciona un proceso de mecanizado conjuntamente se piensa en la herramienta de corte que se va a utilizar, puesto que es el factor crucial para que realice la operación y también estará sometida a altas temperaturas, esfuerzos de contacto y el deslizamiento entre la herramienta y la viruta generada.

Otro factor importante a tener en cuenta es analizar el tipo de herramienta, puesto que cada material a mecanizar tiene propiedades diferentes y si entran en contacto, la mala selección de la herramienta provocara resultados adversos en la mecanización y sobre todo la fractura de la herramienta provocando costos y perdidas de tiempos.

Cada herramienta de corte tiene una dureza específica, para soportar la dureza y resistencia al desgaste de la herramienta a las temperaturas que se presentan en las operaciones de maquinado eso permite que la herramienta no sufra deformación plástica y conserve su forma y filo. (Kalpakjian, y otros, 2008)

Los principales materiales para herramientas son: aceros al carbono para herramientas, aceros de alta velocidad, aleaciones fundidas, carburos, cerámicos y diamante en la siguiente tabla se presenta un breve resumen.

Tabla 13-4: Material de la herramienta

Proceso	Material de herramienta	Material de la pieza
Torneado	Acero de alta velocidad, Aleaciones fundidas, Carburos, Cerámicos, Diamante	Aleaciones de aluminio, de magnesio, de cobre, acero inoxidable, aceros aleados, hierro fundido, acero al carbono
Taladrado	Acero al carbono, Acero de alta velocidad, Carburos	Acero inoxidable, hierro fundido, aleaciones de cobre, magnesio y aluminio
Fresado	Acero alta velocidad, Carburos, Cerámicos, Diamante	Acero aleado, acero inoxidable, acero al carbono, hierro fundido, aleaciones de cobre y aluminio
Cepillado	Acero alta velocidad, Carburos	Acero inoxidable, hierro fundido, aleaciones de aluminio y magnesio, cobre
Rectificado	Carburo (especialmente de silicio), Oxido de aluminio, Nitruro de boro cúbico	Acero aleados, Acero inoxidable, Hierro fundido, acero al carbono
Brochado	Acero de alta velocidad, Carburos	Aceros aleados, aleaciones de magnesio y aluminio
Aserrado	Acero de alta velocidad, Carburos	Aceros aleados, aceros al carbono, aleaciones de cobre, cobre

Fuente: Kalpakjian, Serope y Schmid, Steven. 2008. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Mexico : PEARSON EDUCACIÓN, 2008. Vol. V. ISBN: 978-970-26-1026-7 pág 2040.

4.8.2 Parámetros en el proceso de mecanizado

Una vez establecido las variables fundamentales se deben tener en cuenta los parámetros en el mecanizado y estos son:

- Velocidad de corte.
- Acabado superficial.
- Costo.
- Cantidad.

4.8.2.1 Velocidad de corte

La velocidad de corte también llamada rapidez de remoción de material, su definición varía según el proceso de mecanizado a realizar esto se entiende en el siguiente ejemplo, en el proceso de torneado, se puede interpretar a la velocidad de corte como la distancia (en pies o en metros) que una pieza de trabajo pasa por una punta cortante, a diferencia del proceso de fresado la velocidad de corte se interpreta como la distancia que recorre un diente del cortador en un minuto.

La velocidad de corte es una variable que tiene una relación directa con la clase de material que se mecaniza y la del material de la herramienta de corte, y si no se controla al aumentar la velocidad de corte sin fundamentos la vida útil de la herramienta se reduce considerablemente, por el contrario, si las velocidades de corte son bajas, la herramienta dura mucho más, pero disminuye la velocidad con la que se desbasta el material.

Este parámetro se debe tener en cuenta puesto que esta puede variar dependiendo de qué tipo máquina se utilice para remover el material, para ello se resume en una tabla el rango de velocidades con el proceso y los materiales más utilizados para mecanizar.

Tabla 14-4: Velocidades recomendadas para los procesos de mecanizado

Proceso	Material a mecanizar	Velocidad Superficial	
		m/min	pies/min
Torneado	Aleaciones de aluminio	550 - 490	180 - 1607
	Aleaciones de cobre	90 - 520	295 - 1706
	Acero inoxidable	85 - 215	278 - 705
	Acero aleado	30 - 260	98 - 853
	Hierro fundido	90 - 490	295 - 1607
	Acero carbono	75 - 440	246 - 1443
Taladrado	Acero inoxidable	10 - 20	40 - 60
	Hierro fundido	20 - 60	60 - 200

	Aleaciones de cobre	15 - 60	50 - 200
	Aleaciones de magnesio	45 - 120	150-400
	Aleaciones de aluminio	30 -120	100-400
Fresado	Acero aleado	90 - 210	300 - 700
	Acero inoxidable	120 - 370	400 - 1200
	Acero al carbono	120 -180	400 - 600
	Hierro fundido	120 - 760	400 - 2500
	Aleaciones de cobre	300 - 760	1000-2500
	Aleaciones de aluminio	610 - 900	20000-30000
Cepillado	Acero inoxidable	3 - 6	10 - 20
	Hierro fundido	3 - 6	10 - 20
	Aleaciones de aluminio	90	300
	Aleaciones de magnesio	90	300
Rectificado	Convencional	20 - 30	4000-6000
	Alta velocidad	hasta 150	30000
Brochado	Aceros aleados	15	49
	Aleaciones de aluminio	15	49
	Aleaciones de magnesio	15	49
Aserrado	Aceros aleados	30 - 60	98 - 196
	Aceros al carbono	120 - 180	393 - 590
	Aleaciones de bronce	70 - 274	200 - 900
	Cobre	457	1500
	Aserrado por fricción	7600	25000

Realizado por: Joel Liguay 2018

Fuente: Kalpakjian, Seroppe y Schmid, Steven. 2008. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Mexico : PEARSON EDUCACIÓN, 2008. Vol. V. ISBN: 978-970-26-1026-7 pág 1115.

4.8.2.2 Acabado superficial

Algunas piezas que son producidas en operaciones de trabajo en frio poseen las mismas características que las trabajadas en altas temperaturas.

El acabado superficial conocida como la combinación de precisión dimensional, es decir el valor de la tolerancia y rugosidad, estos permiten que se tenga un buen o mal acabado superficial. Anteriormente ya se mencionó rangos de tolerancia y rugosidad para los procesos de mecanizado por arranque de viruta, y se deduce que mientras más pequeña sea la tolerancia dimensional requerida, el costo de manufactura aumenta por el simple hecho que la pieza necesita operaciones adicionales como el rectificado o el pulido, incrementando el tiempo de maquinado y así mismo sucede con la rugosidad por eso estos factores hacen que el acabado superficial dependa mucho del costo y del tiempo de maquinado al momento de fabricar la pieza.

En la tabla que se presenta a continuación, (Kalpakjian, y otros, 2008) muestra que la rugosidad está estandarizada en la actualidad, en 12 clases diferentes las cuales son:

Tabla 15-4: Rangos de acabado superficial

Clase de rugosidad (μm)	Características
N1 (0,025)	Es el acabado más fino, comúnmente se conoce como acabado espejo puesto.
N2 (0,05)	Es un acabado de alta calidad, comúnmente utilizado cuando el acabado es indispensable para el funcionamiento de la pieza.
N3 (0,1)	Se obtienen herramientas de precisión, entre las cuales se encuentran; cojinetes superacabados, y acoplamientos estancos de alta precisión.
N4 (0,02)	Obtenidas en operaciones de supe acabado como soportes de cigüeñales y árboles de levas.
N5 (0,04)	Acabado de alta calidad, es empleado cuando la pieza necesita un alto acabado para su funcionamiento, como ejes que giran a gran velocidad.
N6 (0,8)	Acabado superior de mecanizado, es utilizado en piezas en las que existan altas concentraciones de esfuerzos o vibraciones
N7 (1,6)	Acabado de buena calidad, comúnmente es empleado en piezas en contacto con tolerancias estrechas como las superficies inferiores o cilindros sometidos a vibraciones
N8 (3,2)	Es considerado el valor medio de mecanizado, es difícil de conseguir en piezas de acero distintas de las planas y cilíndricas, es remendada para aplicaciones que estén sometidas a esfuerzos de fatiga, vibraciones moderadas o grandes esfuerzos
N9 (6,3)	Acabado normal de mecanizado para piezas de acero y titanio es poco costoso obtener este tipo de acabado
N10 (12,5)	Terminación muy basta, es el resultado de los cortes de desbaste o en superficies exteriores de piezas forjadas o extruidas
N11 (25)	Una calidad de muy basta de 25 μm , utilizada en aplicaciones especiales
N12 (50)	Terminación muy basta de 50 μm , utilizada en aplicaciones especiales.

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Kalpakjian, Serope y Schmid, Steven. 2008. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Mexico : PEARSON EDUCACIÓN, 2008. Vol. V. ISBN: 978-970-26-1026-7 pág 1164.

4.8.2.3 Costo

Hay que mencionar que este es un parámetro independiente a los resultados de un trabajo en la pieza hay que recalcar que el dinero que se predispone para el proyecto manda todas las operaciones estudiadas ya que sin dinero no se podrá hacer nada o con dinero y sin estudios tampoco así que por eso el estudio y se lo toma como un parámetro en el mecanizado. Al mencionar las variables y parámetros que se debe tomar en cuenta para un mejor proceso de mecanizado en el taller conlleva un costo por el tiempo de trabajo de la máquina, así como también mencionar la mano de obra.

Para ello más adelante se dedicará un capítulo para su análisis, pero en esta ocasión se dará una guía para seleccionar el proceso de mecanizado ideal, y así tener un valor de costo estimado como muestra y se encuentra en el libro (Kalpakjian, y otros, 2008)

Tabla 16-4: Costos del proceso de mecanizado

Proceso	Costo
Torneado	Bajo a medio
Taladrado	Bajo a medio
Fresado	Bajo a medio
Cepillado	Medio a alto
Rectificado	Bajo a alto
Brochado	Medio a alto
Aserrado	Medio a alto

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Kalpakjian, Serope y Schmid, Steven. 2008. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Mexico : PEARSON EDUCACIÓN, 2008. Vol. V. ISBN: 978-970-26-1026-7 pág 1145.

4.8.2.4 Cantidad

Una cantidad exacta para cada proceso de manufactura es una tarea difícil de estimar puesto que la cantidad influye mucho del buen estado de la máquina, la preparación y rapidez del personal que operan teniendo en claro las características de cada proceso, y se define como la cantidad de piezas que se deben producir por unidad de tiempo (por minuto, por hora, por mes, por año, etc.).

Es muy importante analizar previamente la cantidad de producción, esta puede variar dependiendo el tipo de producto, por ejemplo, la producción en masa de tornillos, arandelas, rodamientos etc. se producen en cantidades muy grandes. Pero si vemos por ejemplo la producción de motores a Diesel, locomotoras y las hélices para barcos se fabrican en cantidades limitadas y bajo pedido.

Para darnos una idea del proceso a seleccionar en base a los costos para este proyecto se rigen en una tabla que resumen el proceso y la cantidad en partes por minuto.

Tabla 17-4: Cantidades del proceso de mecanizado

Proceso	Cantidad (partes por minuto)
Torneado	1 -100
Taladrado	1 -100
Fresado	1 -100
Cepillado	1 -10
Rectificado	1 -100
Brochado	100 -1000
Aserrado	1 -10

Realizado por: Joel Lliguay 2018

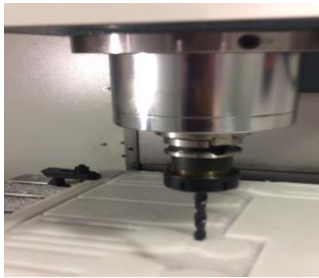
Fuente: Kalpakjian, Serope y Schmid, Steven. 2008. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Mexico : PEARSON EDUCACIÓN, 2008. Vol. V. ISBN: 978-970-26-1026-7 pág 1245.

Una vez analizado todas las variables y parámetros que influyen en el mecanizado y relacionando a las necesidades que necesita en este proyecto después de toda una investigación se concluye con un resumen de los dos procesos de mecanizado a utilizar que es el fresado y el torneado.

Esta descripción ayudara a ver la delimitación de las variables fundamentales y los parámetros brevemente para tener en cuenta al momento de realizar el mecanizado se muestra a continuación

4.8.3 Descripción general del fresado y torneado


Tabla 18-4: Fresado

FRESADO		
	Se máquina la pieza poniéndola en contacto con una herramienta cortando giratoria. Existen dos tipos de fresado: horizontal y frontal, el horizontal se produce una superficie maquinada que es plana o de forma y el fresado frontal el cual implica el maquinado de una cara que se sujeta en ángulo recto con el eje cortador	
Características del proceso		
Formas que mecaniza	Plana, diversa, cilíndrica	
Tolerancia	0.13 - 0.25 (mm)	
Rugosidad	1.6 - 6.3 μm	
Máquinas comúnmente utilizadas	Fresadora de columna: Horizontal, vertical y universal. Fresadora de ménsula Horizontal, vertical y universal. Fresadora tipo bancada	
Cantidades	Se pueden producir de 1 a 100 partes por hora.	
Parámetros de salida		
Las siguientes son las velocidades de corte sugeridas que pueden tomar el proceso teniendo en cuenta los materiales que maquinan		
Velocidad de corte	Acero al carbono	120 - 180 m/min
	Acero aleado	90 - 210 m/min
	Acero inoxidable	120 - 370 m/min
	Aleaciones de aluminio	610 - 900 m/min
	Aleaciones de cobre	610 - 900 m/min
	Hierro fundido	120 - 760 m/min
Tiempo	Baja a media. El tiempo hace referencia a la velocidad normal de producción del proceso.	
Acabado superficial	Teniendo en cuenta los rangos de los valores de rugosidad superficial, en este proceso se puede obtener un acabado superficial de N7 -N9	
Costo	Bajo a medio	
Nota: Las velocidades de producción indicadas son relativas. Muy baja: Es alrededor de una o más partes por hora; Media: Alrededor de 100 partes por hora, Muy alta: es 1000 o más partes por hora.		

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

Tabla 19-4: Torneado

TORNEADO		
	La pieza que se va a manipular gira y la herramienta de corte avanza contra ella.	
Características del proceso		
Formas que maquinan	Cilíndrica	
Tolerancia	0.008 - 1 (mm)	
Rugosidad	0.8 - 6.3 μm	
Máquinas comúnmente utilizadas	Torno Mecánico Torno copiador o trazador Torno de torreta o revólver Torno controlado por computador o automático	
Cantidades	Se pueden producir de 1 a 100 partes por hora.	
Parámetros de salida		
Las siguientes son las velocidades de corte sugeridas que pueden tomar el proceso teniendo en cuenta los materiales que maquinan		
Velocidad de corte	Acero al carbono	75 - 440 m/min
	Acero aleado	30 - 260 m/min
	Acero inoxidable	85 - 215 m/min
	Aleaciones de aluminio	550 - 490 m/min
	Aleaciones de cobre	90 - 520 m/min
	Hierro fundido	90 - 490 m/min
Tiempo	Torno Mecánico – Muy baja o baja. Torno copiador o trazador – Baja a media. Torno de torreta o revólver – Baja a media. Torno controlado por computador o automático – Baja a media.	
Acabado superficial	Teniendo en cuenta los rangos de los valores de rugosidad superficial, en este proceso se puede obtener un acabado superficial de N6 -N9	
Costo	Bajo a medio	
Nota: Las velocidades de producción indicadas son relativas. Muy baja: Es alrededor de una o más partes por hora; Media: Alrededor de 100 partes por hora, Muy alta: es 1000 o más partes por hora.		

Realizado por: Joel Lliguay 2018
Fuente: Autor

4.9 Selección del proceso de manufactura mediante la plataforma virtual CustomPartNet

Existen varias herramientas que ayudan a seleccionar un proceso de manufactura adecuado como lo explicado anteriormente el uso de tablas actualizadas con la experiencia del operario y máquinas del momento que sugiere (Kalpakjian, y otros, 2008) y como esta, con ayuda del internet una plataforma virtual libre llamada Custompartnet.com, el idioma del interfaz se encuentra en ingles con las unidades en el sistema inglés, esta plataforma ayuda a dar una cierta aproximación a los procesos de manufactura que son más compatibles porque esta plataforma se vuelve factible al permitir delimitar siete variables fundamentales a tomar en cuenta en la selección de los procesos de manufactura las cuales son:

- *Forma*

Permite ingresar las formas estandarizadas que se encuentran en el mercado que son: plancha, cilíndrico, cubico y complejo.

- *Material*

Permite ingresar al material en forma de familias como son:

Metales ferrosos: aleación de acero, acero carbono, hierro fundido, acero inoxidable,

Metales no ferrosos: aluminio, cobre, magnesio, níquel, estaño, titanio, zinc, termoplásticos, termoestables y elastómeros.

- *Acabado superficial*

Se selecciona en un rango establecido de la plataforma y la unidad de medida es micro pulgadas Ra (μin).

- *Tolerancia*

Se selecciona en un rango establecido de la plataforma y la unidad de medida es en pulgadas (in).

- *Máximo grosor de la pared*

Se ingresa el valor de espesor máximo de la pared, variable que se aplica principalmente a los procesos de moldeo y se puede ingresar un valor libre.

- *Cantidad*

Se selecciona en un rango establecido de la plataforma

- *Tiempo de ejecución*

Se selecciona entre la medida de tiempo de horas, días, semanas y meses.

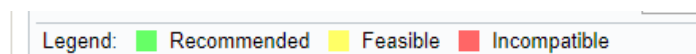
Una vez ingresado estos parámetros empieza a comparar con todos los procesos de manufactura que están en la plataforma clasificados en 4 familias y estos procesos son:

Tabla 20-4: Procesos de manufactura de la plataforma

Procesamiento de polímeros	Fundición de metales	Mecanizado	Formado de metales
<ul style="list-style-type: none"> • Moldeo por compresión. • Moldeo por inyección. • Moldeo por inyección (volumen bajo). • Moldeo por inyección de metal • Polímero de extrusión. • Moldeo rotacional. • Termoformado 	<ul style="list-style-type: none"> • Fundición centrífuga. • Fundición. • Inversión de fundición • Moldeado permanente. • Fundiciones en molde 	<ul style="list-style-type: none"> • Máquina de descarga eléctrica (EDM). • Mecanizado electroquímico, (ECM). • Fresado • Torneado 	<ul style="list-style-type: none"> • En frío. • Extrusión en caliente. • Forjado en caliente. • Impacto de extrusión. • Pulvimetalurgia. • Matrizado. • Hoja de fabricación de metal.

Realizado por: Joel Lliguay 2018
Fuente: Autor

Al momento de comparar las variables con los procesos de manufactura la plataforma indica mediante un gráfico de 3 colores una respuesta de selección, el color verde es un proceso recomendado, el color amarillo es un proceso factible y el color rojo quiere decir que el proceso es incompatible y no se sugiere ese proceso de manufactura.



Se procede a la selección del proceso de manufactura para el proyecto y a continuación se realiza la selección del proceso de manufactura esperado:

Material: GRILON que es un termoplástico obtenido a partir de Poliamida 6

4.9.1.1 *Análisis de la primera plancha de 15 mm (0.59 in).*

Forma: plancha

Acabado superficial: N6 ($0.8 \mu\text{m}$ o $32 \mu\text{in}$)

Tolerancia: 0.20 mm aproximadamente 0.005 in

Grosor de pared: 15 mm (0.59 in)

Cantidad: 1-100

Tiempo de espera: horas.

Figura 20-4: Ingreso de datos de variables de mecanizado

Fuente: <http://www.custompartnet.com/process-selector>

Resultados:

Process	Compare	Shape	Material Type	Surface Finish	Tolerance	Wall Thickness	Quantity	Lead Time
Polymer Processing								
<input type="checkbox"/> Blow Molding		Green	Green	Red	Red	Red	Red	Red
<input type="checkbox"/> Compression Molding		Green	Yellow	Red	Red	Yellow	Red	Red
<input type="checkbox"/> Contact Molding		Green	Red	Yellow	Red	Green	Yellow	Red
<input type="checkbox"/> Injection Molding		Green	Green	Red	Yellow	Red	Red	Red
<input type="checkbox"/> Injection Molding (Low Volume)		Green	Green	Red	Yellow	Red	Red	Yellow
<input type="checkbox"/> Metal Injection Molding		Green	Red	Yellow	Green	Yellow	Red	Red
<input type="checkbox"/> Polymer Extrusion		Green	Green	Green	Red	Green	Red	Red
<input type="checkbox"/> Rotational Molding		Green	Green	Red	Red	Red	Yellow	Red
<input type="checkbox"/> Thermoforming		Green	Green	Yellow	Red	Red	Yellow	Red
Metal Casting								
<input type="checkbox"/> Centrifugal Casting		Red	Red	Yellow	Yellow	Green	Yellow	Red
<input type="checkbox"/> Die Casting		Yellow	Red	Green	Yellow	Yellow	Red	Red
<input type="checkbox"/> Investment Casting		Yellow	Red	Yellow	Green	Green	Yellow	Red
<input type="checkbox"/> Permanent Mold Casting		Yellow	Red	Yellow	Red	Green	Red	Red
<input type="checkbox"/> Sand Casting		Yellow	Red	Red	Red	Green	Green	Yellow
<input type="checkbox"/> Shell Mold Casting		Yellow	Red	Yellow	Red	Green	Red	Red
Machining								
<input type="checkbox"/> Electrical Discharge Machining (EDM)		Yellow	Red	Yellow	Green	Red	Green	Red
<input type="checkbox"/> Electrochemical Machining (ECM)		Yellow	Red	Yellow	Green	Red	Green	Red
<input type="checkbox"/> Milling		Yellow	Yellow	Green	Green	Green	Green	Yellow
<input type="checkbox"/> Turning		Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Yellow
Metal Forming								
<input type="checkbox"/> Cold Heading		Red	Red	Green	Yellow	Green	Red	Red
<input type="checkbox"/> Hot Extrusion		Green	Red	Yellow	Yellow	Green	Red	Red
<input type="checkbox"/> Hot Forging		Yellow	Red	Red	Red	Green	Yellow	Red
<input type="checkbox"/> Impact Extrusion		Green	Red	Green	Green	Green	Red	Red
<input type="checkbox"/> Powder Metallurgy		Yellow	Red	Yellow	Green	Red	Red	Red
<input type="checkbox"/> Sheet Metal Fabrication		Green	Red	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
<input type="checkbox"/> Swaging		Yellow	Red	Green	Green	Green	Yellow	Red

Figura 21-4: Selección del proceso de mecanizado

Fuente: <http://www.custompartnet.com/process-selector>

El único proceso que no tiene un color incompatible es el proceso de fresado donde muestra las variables con procesos recomendados y factibles. En conclusión, para mecanizar la plancha de Grilon es por medio del fresado.

4.9.1.2 Análisis de la segunda plancha de 25 mm (0.98 in) .

- Forma: plancha
- Acabado superficial: N6 (0.8 μm o 32 μin)
- Tolerancia: 0.20 mm aproximadamente 0.005 in
- Grosor de pared: 25 mm (0.98 in)
- Cantidad: 1-100
- Tiempo de espera: horas.

 **Selector de proceso** Proveedores

Producción **Prototipado rápido**

El selector de proceso de producción identificará procesos de fabricación que sean compatibles con los requisitos de diseño de su pieza. La selección del proceso depende de varios factores, incluida la geometría y el material de la pieza, así como

Forma: Pared delgada: cúbico Acabado superficial - Ra (µin): 32-63 Cantidad: 1-100

Material: Termoplásticos Tolerancia (en): ± 0.005 Tiempo de espera: Horas

Grosor máximo de la pared (en): 0.98

Figura 22-4: Ingreso de datos de variables de mecanizado

Fuente: <http://www.custompartnet.com/process-selector>

Resultados:

Process	Compare	Shape	Material Type	Surface Finish	Tolerance	Wall Thickness	Quantity	Lead Time
Polymer Processing								
<input type="checkbox"/> Blow Molding								
<input type="checkbox"/> Compression Molding								
<input type="checkbox"/> Contact Molding								
<input type="checkbox"/> Injection Molding								
<input type="checkbox"/> Injection Molding (Low Volume)								
<input type="checkbox"/> Metal Injection Molding								
<input type="checkbox"/> Polymer Extrusion								
<input type="checkbox"/> Rotational Molding								
<input type="checkbox"/> Thermoforming								
Metal Casting								
<input type="checkbox"/> Centrifugal Casting								
<input type="checkbox"/> Die Casting								
<input type="checkbox"/> Investment Casting								
<input type="checkbox"/> Permanent Mold Casting								
<input type="checkbox"/> Sand Casting								
<input type="checkbox"/> Shell Mold Casting								
Machining								
<input type="checkbox"/> Electrical Discharge Machining (EDM)								
<input type="checkbox"/> Electrochemical Machining (ECM)								
<input type="checkbox"/> Milling								
<input type="checkbox"/> Turning								
Metal Forming								
<input type="checkbox"/> Cold Heading								
<input type="checkbox"/> Hot Extrusion								
<input type="checkbox"/> Hot Forging								
<input type="checkbox"/> Impact Extrusion								
<input type="checkbox"/> Powder Metallurgy								
<input type="checkbox"/> Sheet Metal Fabrication								
<input type="checkbox"/> Swaging								

Figura 23-4: Selección del proceso de mecanizado

Fuente: <http://www.custompartnet.com/process-selector>

El único proceso que no tiene un color incompatible es el proceso de fresado donde muestra las variables con procesos recomendados y factibles. En conclusión, para mecanizar la plancha de Grilon es por medio del fresado.

CAPÍTULO V

5. SIMULACIÓN DEL MECANIZADO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL EXOESQUELETO

5.1 Simulación del mecanizado de los componentes que conforman el exoesqueleto

Para la simulación del mecanizado se analizará en el software NX 11 Siemens, previamente se necesita el modelado del proyecto que por facilidad se realizó en el programa SolidWorks y se guarda en formato. step o. igs para seguidamente trasladar al software NX 11.

5.1.1 Modelación CAD

Se modela la plancha y las bridas de sujeción, colocando las piezas diseñadas en un orden correcto y adecuado para la mecanización.

5.1.1.1 Distribución de la plancha de 15mm espesor con sus respectivas piezas.

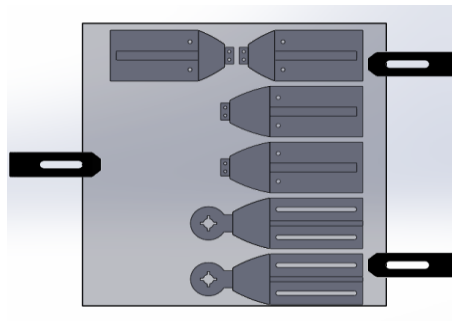


Figura 1-5: Vista frontal

Fuente: Autor

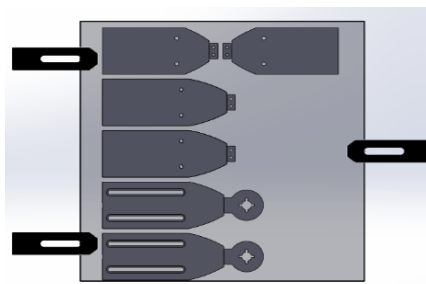


Figura 2-5: Vista posterior

Fuente: Autor

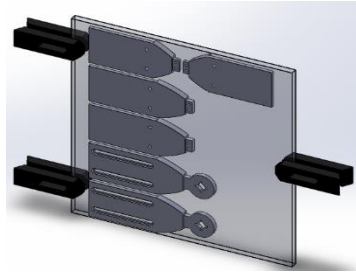


Figura 3-5: Vista isométrica
Fuente: Autor

5.1.1.2 *Distribución de la plancha de 25 mm de espesor con sus respectivas piezas.*

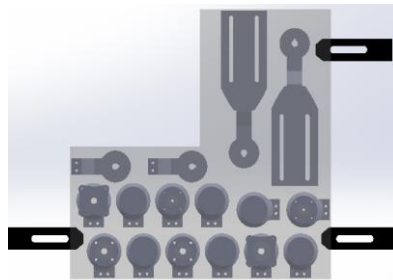


Figura 4-5: Vista frontal
Fuente: Autor

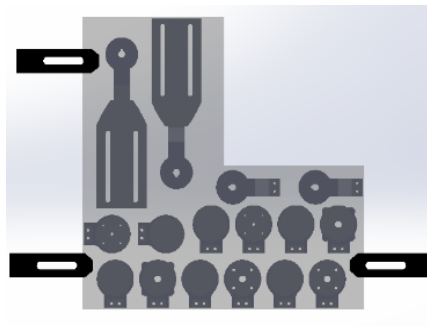


Figura 5-5: Vista posterior
Fuente: Autor

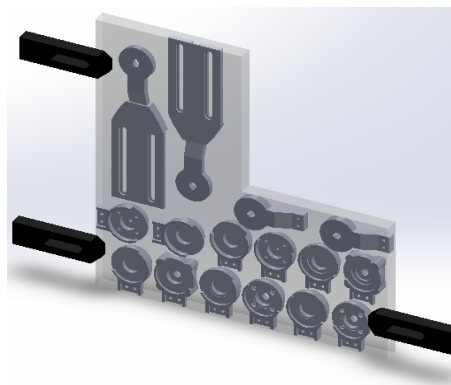


Figura 6-5: Vista isométrica
Fuente: Autor

Para el mecanizado se debe colocar parámetros importantes que previamente se debe calcular y analizar cómo es el tipo de herramienta, estrategias de mecanizado, velocidades en el fresado, velocidades del desbaste y acabado en el torno, avances, parámetros de corte, etc.

5.1.2 Cálculo de velocidades y avances de corte

Según la sugerencia de la tabla de (Kalpakjian, y otros, 2008) para elegir el material de la herramienta se encontró en el mercado la herramienta adecuada que es una fresa de acero rápido HSS-E (8% Co) como se puede describir este acero especial es de alto rendimiento con elevada dureza y resistencia al desgaste gracias a elementos de aleación como el tungsteno, molibdeno, vanadio y cromo.

Las velocidades de corte están establecidas por tablas y dependiendo del proceso de acabado refinado etc., se debe controlar esas velocidades y analizar los parámetros como velocidad de rotación de la herramienta y la velocidad de avance mediante las fórmulas mencionadas anteriormente.

5.1.2.1 Fresa plana de 5 mm (HSS-E)

Valores sugeridos para esta herramienta está en libros y catálogos se expresan en la siguiente tabla:

Tabla 1-5: Valores de la herramienta

Velocidad de corte (m/min)	Avance por diente (mm/diente)	Numero de dientes de la fresa (diente/rev)
V_c	S_z	Z
100-450	0,1	4

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

$V_c = 100 \frac{m}{min}$ Para el refinado se escoge una velocidad baja para obtener buenos resultados y evitar el desgaste y fracturas de los filos de corte de la herramienta y alargar la vida de útil de la herramienta.

- *Velocidad de rotación de la herramienta (N)*

$$N = \frac{V_c \times 1000}{D \times \pi}$$

$$N = \frac{100 \frac{m}{min} \times 1000}{5 mm \times \pi}$$

$$N = 6366,19 \frac{rev}{min}$$

El resultado nos permite tomar acciones puesto que el máximo número de revoluciones del centro de mecanizado de Bridgeport VMC 800-22 $\eta_{max.} = 4500$ rpm y del centro de mecanizado Romí D600 $\eta_{max.} = 7500$ rpm

En el centro de mecanizado Romí D600 se acepta la velocidad calculada: $N = 6366,19 \frac{rev}{min}$

- *Velocidad de avance (V_f)*

$$V_f = S_z \times Z \times N$$

$$V_f = 0,1 \frac{mm}{diente} \times 4 \frac{diente}{rev} \times 6366,19 \frac{rev}{min}$$

$$V_f = 2546,48 \frac{mm}{min}$$

En el centro de mecanizado Bridgeport VMC 800-22 se toma el valor máximo de la máquina:

$$N = 4500 \frac{rev}{min}$$

- *Velocidad de avance (V_f)*

$$V_f = S_z \times Z \times N$$

$$V_f = 0,1 \frac{mm}{diente} \times 4 \frac{diente}{rev} \times 4500 \frac{rev}{min}$$

$$V_f = 1800 \frac{mm}{min}$$

5.1.2.2 Fresa plana de 8 mm (HSS-E)

Valores sugeridos para esta herramienta está en libros y catálogos se expresan en la siguiente tabla:

Tabla 2-5: Valores de la herramienta

Velocidad de corte (m/min)	Avance por diente (mm/diente)	Numero de dientes de la fresa. (diente/rev)
V_c	S_z	Z
100-450	0,1	4

Realizado por: Joel Lliguay 2018**Fuente:** Autor

$V_c = 150 \frac{m}{min}$ Para el acabado se escoge una velocidad promedio para obtener buenos resultados y evitar el desgaste y fracturas de los filos de corte de la herramienta y alargar la vida de útil de la herramienta.

- *Velocidad de rotación de la herramienta (N)*

$$N = \frac{V_c \times 1000}{D \times \pi}$$

$$N = \frac{150 \frac{m}{min} \times 1000}{8 mm \times \pi}$$

$$N = 5968,31 \frac{rev}{min}$$

El resultado nos permite tomar acciones puesto que el máximo número de revoluciones del centro de mecanizado de Bridgeport VMC 800-22 $\eta_{max} = 4500$ rpm y del centro de mecanizado Romí D600 $\eta_{max} = 7500$ rpm

En el centro de mecanizado Romí D600 se acepta la velocidad calculada: $N = 5968,31 \frac{rev}{min}$

- *Velocidad de avance (V_f)*

$$V_f = S_z \times Z \times N$$

$$V_f = 0,1 \frac{mm}{diente} \times 4 \frac{diente}{rev} \times 5968,31 \frac{rev}{min}$$

$$V_f = 2387,32 \frac{mm}{min}$$

En el centro de mecanizado Bridgeport VMC 800-22 se toma el valor máximo de la máquina:

$$N = 4500 \frac{rev}{min}$$

- *Velocidad de avance (V_f)*

$$V_f = S_z \times Z \times N$$

$$V_f = 0,1 \frac{mm}{diente} \times 4 \frac{diente}{rev} \times 4500 \frac{rev}{min}$$

$$V_f = 1800 \frac{mm}{min}$$

5.1.2.3 Fresa plana de 10 mm (HSS-E)

Valores sugeridos para esta herramienta está en libros y catálogos se expresan en la siguiente tabla:

Tabla 3-5: Valores de la herramienta

Velocidad de corte (m/min)	Avance por diente (mm/diente)	Numero de dientes de la fresa. (diente/rev)
V_c	S_z	Z
100-450	0,1	4

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

$V_c = 200 \frac{m}{min}$ Para el acabado se escoge una velocidad promedio para obtener buenos resultados y evitar el desgaste y fracturas de los filos de corte de la herramienta y alargar la vida de útil de la herramienta.

- *Velocidad de rotación de la herramienta (N)*

$$N = \frac{V_c \times 1000}{D \times \pi}$$

$$N = \frac{200 \frac{m}{min} \times 1000}{10 mm \times \pi}$$

$$N = 6366,19 \frac{rev}{min}$$

El resultado nos permite tomar acciones puesto que el máximo número de revoluciones del centro de mecanizado de Bridgeport VMC 800-22 $\eta_{max.} = 4500$ rpm y del centro de mecanizado Romí D600 $\eta_{max.} = 7500$ rpm

En el centro de mecanizado Romí D600 se acepta la velocidad calculada: $N = 6366,19 \frac{rev}{min}$

- Velocidad de avance (V_f)

$$V_f = S_z \times Z \times N$$

$$V_f = 0,1 \frac{mm}{diente} \times 4 \frac{diente}{rev} \times 6366,19 \frac{rev}{min}$$

$$V_f = 2546,48 \frac{mm}{min}$$

En el centro de mecanizado Bridgeport VMC 800-22 se toma el valor máximo de la máquina:

$$N = 4500 \frac{rev}{min}$$

- Velocidad de avance (V_f)

$$V_f = S_z \times Z \times N$$

$$V_f = 0,1 \frac{mm}{diente} \times 4 \frac{diente}{rev} \times 4500 \frac{rev}{min}$$

$$V_f = 1800 \frac{mm}{min}$$

5.1.2.4 Fresa cola de milano de 16x60mm (HSS-E)

Valores sugeridos para esta herramienta está en libros y catálogos se expresan en la siguiente tabla:

Tabla 4-5: Valores de la herramienta

Velocidad de corte (m/min)	Avance por diente (mm/diente)
V_c	S_z
150-200	0,15

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

$V_c = 200 \frac{m}{min}$ para la operación de la cola de milano se selecciona una velocidad adecuada.

- *Velocidad de rotación de la herramienta (N)*

$$N = \frac{V_c \times 1000}{D \times \pi}$$

$$N = \frac{200 \frac{m}{min} \times 1000}{16 mm \times \pi}$$

$$N = 3978,87 \frac{rev}{min}$$

- *Velocidad de avance (V_f)*

$$V_f = S_z \times Z \times N$$

$$V_f = 0,15 \frac{mm}{diente} \times 4 \frac{diente}{rev} \times 3978,87 \frac{rev}{min}$$

$$V_f = 2387,32 \frac{mm}{min}$$

5.1.2.5 Broca de 4 mm – HSS

Valores sugeridos para esta herramienta está en libros y catálogos se expresan en la siguiente tabla:

Tabla 5-5: Valores de la herramienta

Velocidad de corte (m/min)	Avance por vuelta (mm/rev)
V _c	f _n
30-120	0,3

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

V_c = 60 $\frac{m}{min}$ la velocidad seleccionada para la perforación es promedio ya que garantiza buenos resultados y evitar el desgaste y fracturas de los filos de corte de la herramienta y alargar la vida de útil de la herramienta.

- *Velocidad de rotación de la herramienta (N)*

$$N = \frac{V_c \times 1000}{D \times \pi}$$

$$N = \frac{60 \frac{m}{min} \times 1000}{4 mm \times \pi}$$

$$N = 4774,64 \frac{rev}{min}$$

- Velocidad de avance (V_f)

$$V_f = f_n \times N$$

$$V_f = 0,3 \frac{mm}{rev} \times 4774,64 \frac{rev}{min}$$

$$V_f = 1432,32 \frac{mm}{min}$$

5.1.2.6 Broca de 5 mm – HSS

Valores sugeridos para esta herramienta está en libros y catálogos se expresan en la siguiente tabla:

Tabla 6-5: Valores de la herramienta

Velocidad de corte (m/min)	Avance por vuelta (mm/rev)
V_c	f_n
30-120	0,3

Realizado por: Joel Lliguay 2018
Fuente: Autor

$V_c = 60 \frac{m}{min}$ la velocidad seleccionada para la perforación es promedio ya que garantiza buenos resultados y evitar el desgaste y fracturas de los filos de corte de la herramienta y alargar la vida de útil de la herramienta.

- Velocidad de rotación de la herramienta (N)

$$N = \frac{V_c \times 1000}{D \times \pi}$$

$$N = \frac{60 \frac{m}{min} \times 1000}{5 mm \times \pi}$$

$$N = 3819,72 \frac{rev}{min}$$

- Velocidad de avance (V_f)

$$V_f = f_n \times N$$

$$V_f = 0,3 \frac{mm}{rev} \times 3819,72 \frac{rev}{min}$$

$$V_f = 1145,92 \frac{mm}{min}$$

5.1.2.7 Broca de 12 mm – HSS

Valores sugeridos para esta herramienta está en libros y catálogos se expresan en la siguiente tabla:

Tabla 7-5: Valores de la herramienta

Velocidad de corte (m/min)	Avance por vuelta (mm/rev)
V_c	f_n
30-120	0,3

Realizado por: Joel Lliguay 2018
Fuente: Autor

$V_c = 60 \frac{m}{min}$ la velocidad seleccionada para la perforación es promedio ya que garantiza buenos resultados y evitar el desgaste y fracturas de los filos de corte de la herramienta y alargar la vida de útil de la herramienta.

- *Velocidad de rotación de la herramienta (N)*

$$N = \frac{V_c \times 1000}{D \times \pi}$$

$$N = \frac{60 \frac{m}{min} \times 1000}{12 mm \times \pi}$$

$$N = 1591,54 \frac{rev}{min}$$

- *Velocidad de avance (V_f)*

$$V_f = f_n \times N$$

$$V_f = 0,3 \frac{mm}{rev} \times 1591,54 \frac{rev}{min}$$

$$V_f = 477,46 \frac{mm}{min}$$

5.1.2.8 Broca de centros 10 mm – HSS

Valores sugeridos para esta herramienta está en libros y catálogos se expresan en la siguiente tabla:

Tabla 8-5: Valores de la herramienta

Velocidad de corte (m/min)	Avance por vuelta (mm/rev)
V_c	f_n
80-120	0,12

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

$V_c = 90 \frac{m}{min}$ la velocidad seleccionada es promedio ya que garantiza buenos resultados y evitar el desgaste y fracturas de los filos de corte de la herramienta y alargar la vida de útil de la herramienta.

- *Velocidad de rotación de la herramienta (N)*

$$N = \frac{V_c \times 1000}{D \times \pi}$$

$$N = \frac{90 \frac{m}{min} \times 1000}{10 mm \times \pi}$$

$$N = 2865 \frac{rev}{min}$$

- *Velocidad de avance (V_f)*

$$V_f = f_n \times N$$

$$V_f = 0,12 \frac{mm}{rev} \times 2865 \frac{rev}{min}$$

$$V_f = 344 \frac{mm}{min}$$

5.1.2.9 Velocidad de debaste en el torno en eje de 19mm

$V_c = 27 \frac{m}{min}$ la velocidad seleccionada es promedio ya que garantiza buenos resultados y evitar el desgaste y fracturas de los filos de corte de la herramienta y alargar la vida de útil de la herramienta.

$$N = \frac{V_c \times 1000}{D \times \pi}$$

$$N = \frac{27 \frac{m}{min} \times 1000}{19 mm \times \pi}$$

$$N = 452,3 \frac{rev}{min}$$

5.1.2.10 Velocidad de acabado en el torno en eje de 19mm

$V_c = 100 \frac{m}{min}$ la velocidad seleccionada es promedio ya que garantiza buenos resultados y evitar el desgaste y fracturas de los filos de corte de la herramienta y alargar la vida de útil de la herramienta

$$N = \frac{V_c \times 1000}{D \times \pi}$$

$$N = \frac{100 \frac{m}{min} \times 1000}{19 mm \times \pi}$$

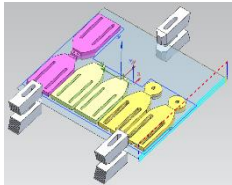
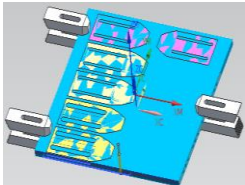
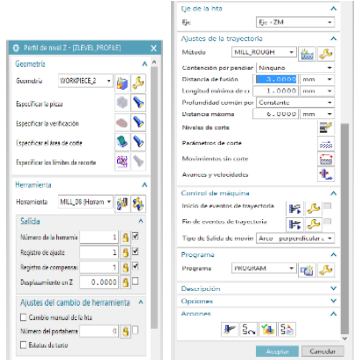
$$N = 1675,3 \frac{rev}{min}$$

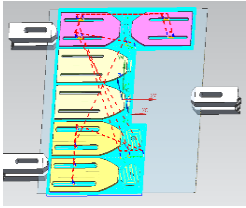
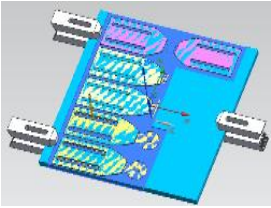
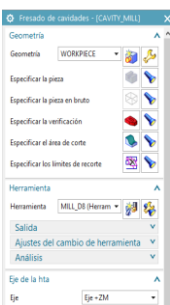
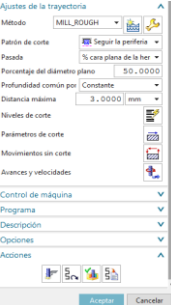
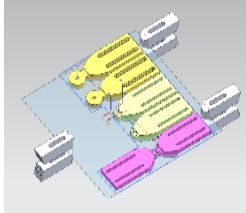
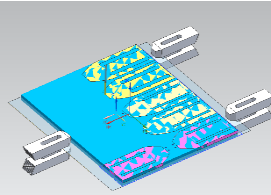
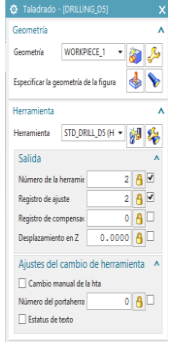
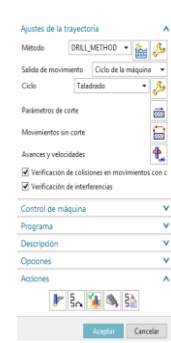
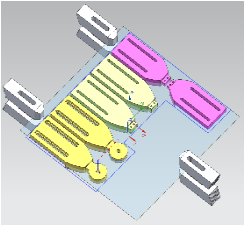
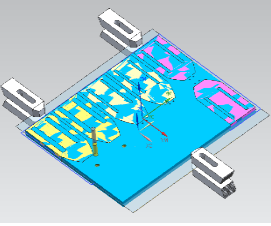
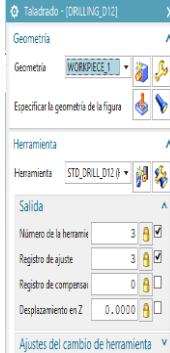
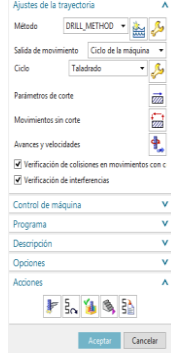
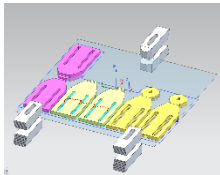
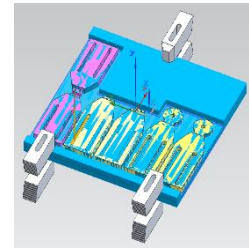
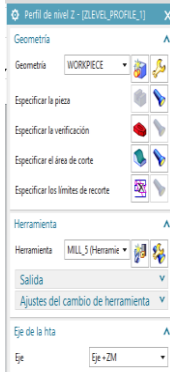
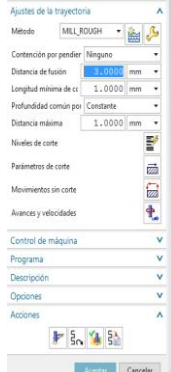
Los valores calculados son introducidos en el software NX para garantiza un buen proceso de mecanizado.

5.1.3 Operaciones de fresado

Estas operaciones simulan las operaciones del fresado sobre el material y sacar el código g de programación para llevar al centro de mecanizado y ejecutar las operaciones asignadas.

Tabla 9-5: Operaciones de fresado para la plancha de 15 mm primera cara

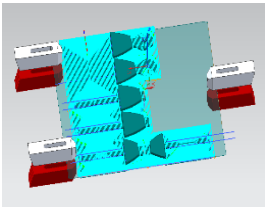
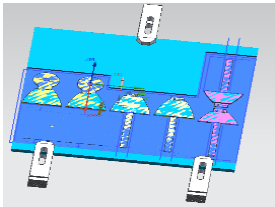
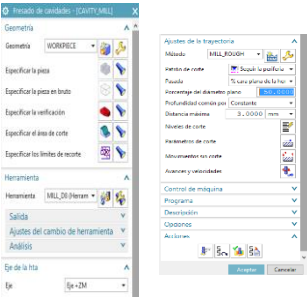
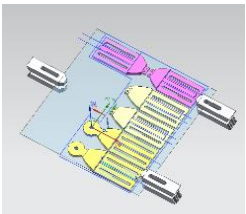
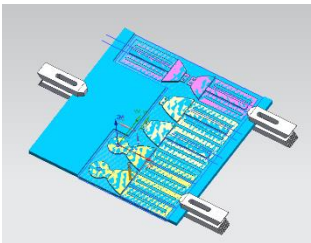
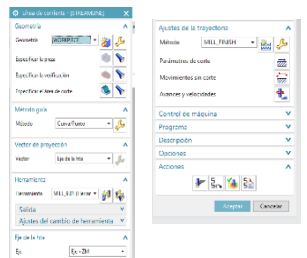
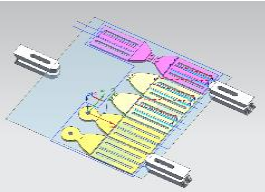
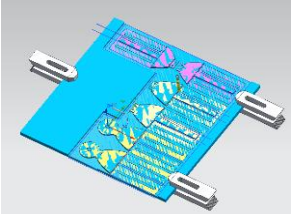
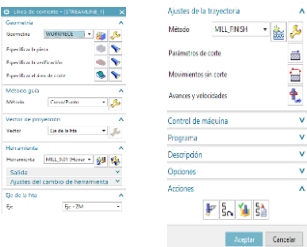
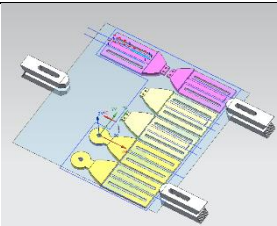
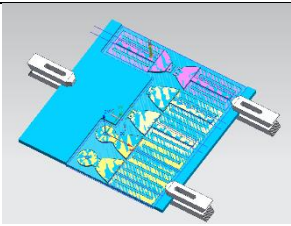
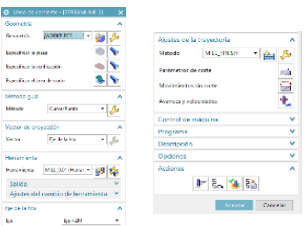
Operaciones del fresado	Trayectoria de la herramienta	Simulación	Parámetros
Perfil de nivel z			

Fresado de cavidades			 
Taladrado broca de 5mm			 
Taladrado broca de 12mm			 
Perfil de nivel z			 

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

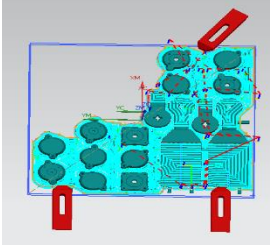
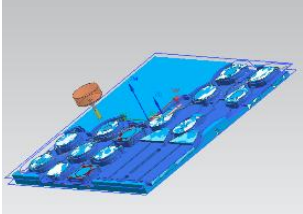
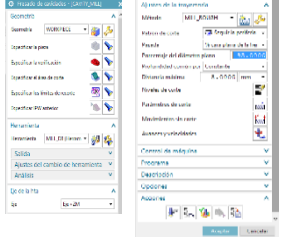
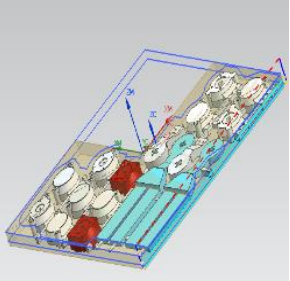
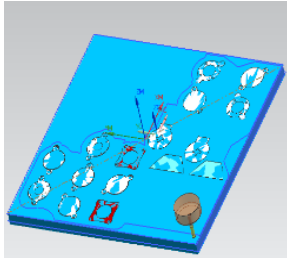
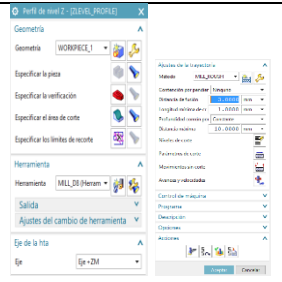
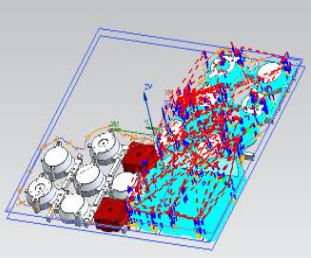
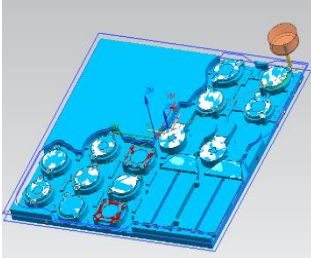
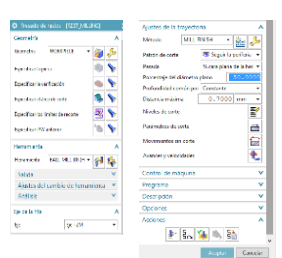
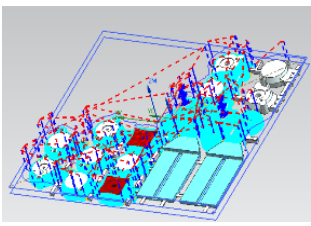
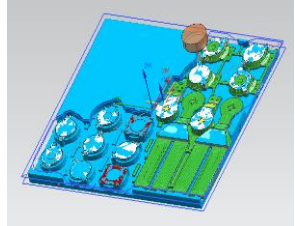
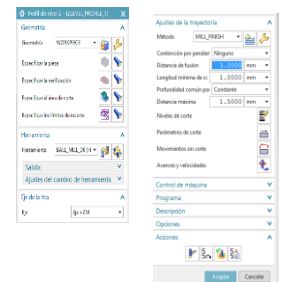
Tabla 10-5: Operaciones de fresado para la plancha de 15 mm segunda cara

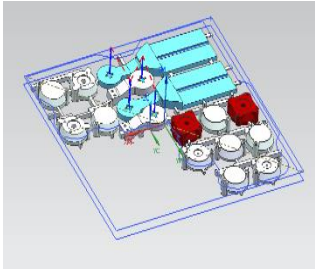
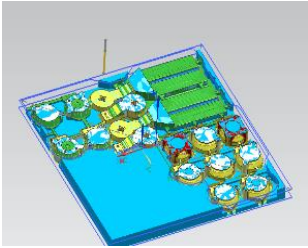
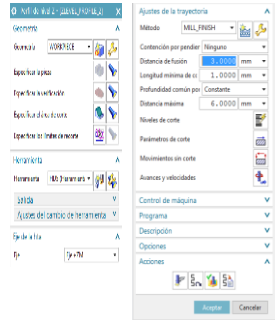
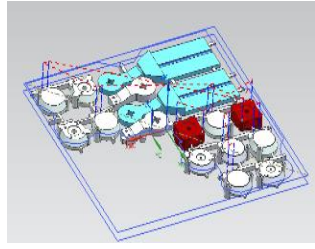
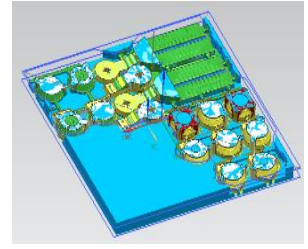
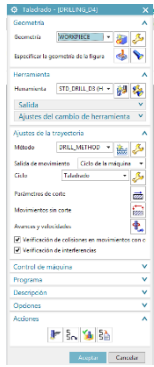
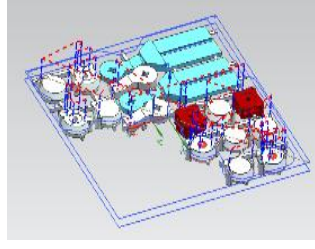

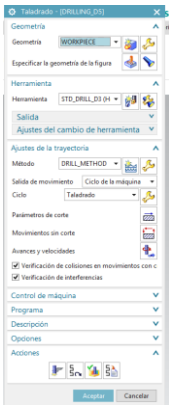
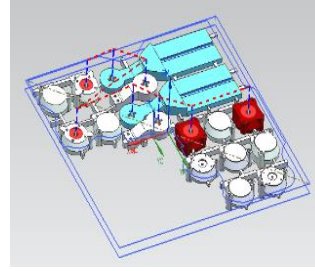
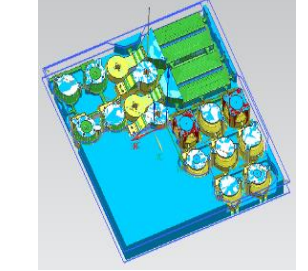
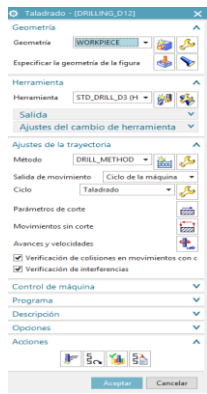
Operaciones del fresado	Trayectoria de la herramienta	Simulación	Parámetros
Fresado de cavidades			
Línea de corriente			
Línea de corriente 1			
Línea de corriente 2			

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

Tabla 11-5: Operaciones de fresado para la plancha de 25 mm primera cara

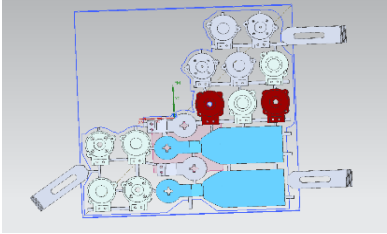
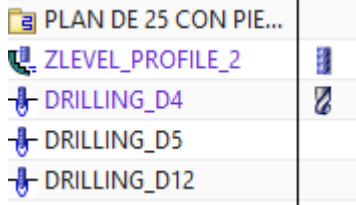
Operaciones del fresado	Trayectoria de la herramienta	Simulación	Parámetros
Fresado de cavidades			
Perfil de nivel z			
Fresado de restos			
Perfil de nivel z (1)			

<p>Perfil de nivel z (2)</p>			
<p>Taladrado broca de 4mm</p>			
<p>Taladrado broca de 5 mm</p>			
<p>Taladrado broca de 12mm</p>			

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

Tabla 12-5: Operaciones de fresado para la plancha de 25 mm segunda cara

Plancha de 25mm lado 2	Operaciones en la plancha de 25mm
	

Realizado por: Joel Lliguay 2018



Fuente: Autor



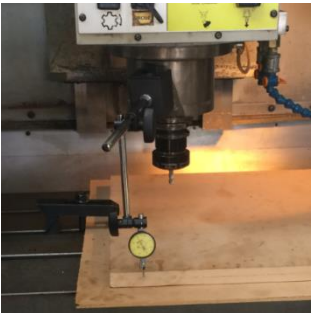


5.2 Construcción de los eslabones y articulaciones del exoesqueleto

5.2.1 Pruebas de los procesos de fresado en madera

El objetivo de las pruebas en madera es con el fin de comprobar el estado del centro del mecanizado, la programación del código g, la herramienta y los parámetros seleccionados, puesto que si se realiza la mecanización en la plancha directamente estamos arriesgando el material y el tiempo de trabajo. A continuación, se muestra los procesos realizados en madera.

Tabla 13-5: Descripción de los procesos de fresado en madera

Paso #	Fotografía	Proceso	Herramientas	Maquinaria	Horas
1		Escuadrado de la plancha de madera.		-Centro de mecanizado CNC	0.5
2		Colocación de las bridas de sujeción.	-Bridas	-Centro de mecanizado CNC	0.20

3		Colocación de la herramienta	-Cono portaherramientas	-Centro de mecanizado CNC	0.16
4		Preparar el panel de centro de mecanizado		-Centro de mecanizado CNC	0.10
5		Encontrar el cero piezas.	-Reloj verificador	-Centro de mecanizado CNC	0.25
6		Importar la programación (línea de código) a la fresadora	-Cable RS-232 -Computadora	-Centro de mecanizado CNC	0.10
7		Mecanizado	-Fresa plana diam.8mm.	-Centro de mecanizado CNC	1

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

5.2.1.1 Resultados

Como se puede observar, en la madera ya empieza a dar forma de las piezas y comprobamos que el centro de mecanizado y la herramienta tienen un buen desenvolvimiento en su trabajo.





Figura 7-5: Pruebas en madera

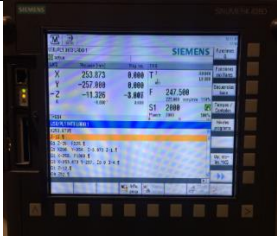
Fuente: Autor

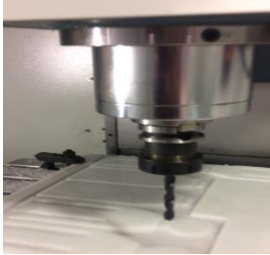
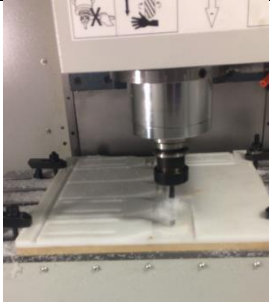
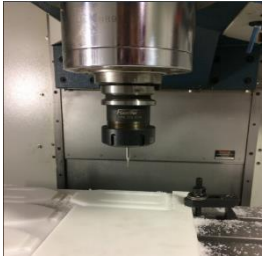
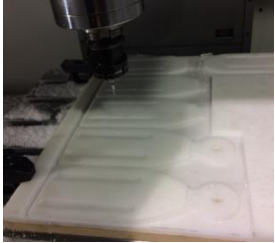

5.2.2 Mecanización de la plancha de grilon de 15mm de espesor


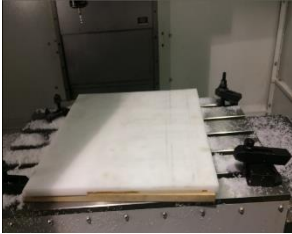
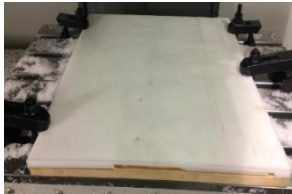



Tabla 14-5: Descripción de los procesos de fresado de la plancha de grilon de 15mm


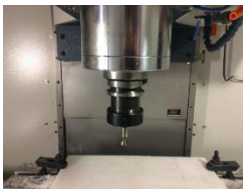


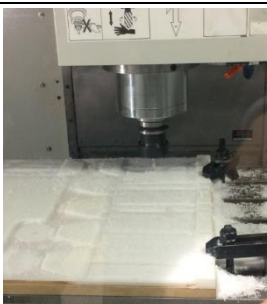
Paso #	Fotografía	Proceso	Herramientas	Maquinaria	Horas
1		Verificar la caja del medidor y activar los brakers necesarios.	-Desarmador estrella.		0.08
2		Verificar los componentes del aire y del filtro regulador estén bien conectados y funcionales.		-Centro de mecanizado CNC	0.08



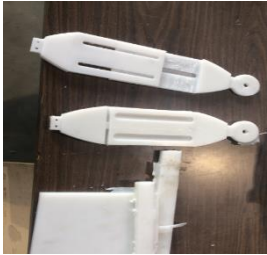

3		Controlar la presión del compresor (25psi)			0.016
4		Encender la máquina.		-Centro de mecanizado CNC	0.016
5		Quitar paro de emergencia.		-Centro de mecanizado CNC	0.016
6		Verificar la pantalla del centro de mecanizado para observar el estado de este.		-Centro de mecanizado CNC.	0.08
7		Escuadrado de la plancha de 15mm espesor en la mesa del centro de mecanizado.		-Centro de mecanizado CNC.	0.16

8		Colocación de las bridas de sujeción.	-Bridas	-Centro de mecanizado CNC	0.16
9		Preparar el portaherramientas con la fresa.	-Portaherramientas -Fresa Diam. 8mm. -Llaves de ajuste	-Centro de mecanizado CNC	0.016
10		Colocar el portaherramientas en el carrusel.	-Portaherramientas -Fresa Diam. 8mm.	-Centro de mecanizado CNC	0.016
11		Encontrar el cero pieza. X=0 Y=0 Z=0	-Reloj verificador	-Centro de mecanizado CNC	0.25
12		Enviar la línea de códigos con las operaciones de la 1 cara.	-Flash-memory computadora	-Centro de mecanizado CNC	0.08
13		Desbaste de la cara 1 de la plancha.	-Fresa Diam. 8mm.	-Centro de mecanizado CNC	4
14		Punteado previo al Taladrado.	-Broca de centros	-Centro de mecanizado CNC	0.16

15		Preparar el portaherramientas con la broca y volver a calibrar en el eje z=0	- Portaherramientas. - Broca. diam.12mm, - Llaves de ajuste.	- Centro de mecanizado CNC	0.08
16		Taladrado con las brocas correspondientes.	- Broca diam.12mm, - Broca Diam. 5mm,	- Centro de mecanizado CNC	1
17		Preparar el portaherramientas con la fresa y volver a calibrar en el eje z=0.	- Portaherramientas - Llaves de ajuste - Fresa Diam. 5mm.	- Centro de mecanizado CNC	0.16
18		Debastar los agujeros deslizantes	- Portaherramientas - Llaves de ajuste - Fresa Diam. 5mm.	- Centro de mecanizado CNC	1
19		Desbastar los chaveteros.	- Portaherramientas - Llaves de ajuste - Fresa Diam. 5mm.	- Centro de mecanizado CNC	0.5

20		Una vez terminado la 1 cara todas las operaciones designadas procedemos a preparar la 2 cara para iniciar las operaciones de mecanizado.		-Centro de mecanizado CNC	0.08
21		Escuadrado de la plancha de 15mm espesor en la mesa del centro de mecanizado.		-Centro de mecanizado CNC	0.16
22		Colocación de las bridas de sujeción.	-Bridas	-Centro de mecanizado CNC	0.16
23		Encontrar el cero pieza. X=0 Y=0 Z=0	-Reloj verificador	-Centro de mecanizado CNC	0.25
24		Enviar la línea de códigos programado con las operaciones de cola de milano con la fresa de 8mm.	-Flash-memory computadora	-Centro de mecanizado CNC	0.08
25		Preparar el portaherramientas con la fresa y volver a calibrar en el eje z=0 para desbastar guías para realizar la operación de cola de milano.	-Portaherramientas -Fresa Diam. 8mm. -Llaves de ajuste	-Centro de mecanizado CNC	1

26		Preparar el portaherramientas con la fresa cola milano	-Portaherramientas -Llaves de ajuste		0.016
27		Colocar en el carrusel y volver a calibrar en el eje z=0.	-Fresa Cola de milano. 16x60mm.	-Centro de mecanizado CNC	0.16
28		Enviar la línea de códigos programado con las operaciones de cola de milano.	-Flash-memory computadora	-Centro de mecanizado CNC	0.08
29		Desbaste programado para realizar la operación de cola de milano.	-Fresa Cola de milano. 16x60mm.	-Centro de mecanizado CNC	2
30		Preparar el portaherramientas con la fresa y volver a calibrar en el eje z=0 para desbastar todas las operaciones programadas en el lado 2 de la plancha.	-Portaherramientas -Fresa Diam. 8mm. -Llaves de ajuste	-Centro de mecanizado CNC	1

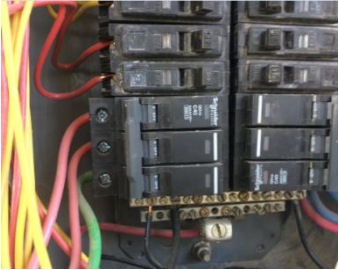



31		Enviar la línea de códigos programado con las operaciones de cola de milano.	-Flash-memory -computadora	-Centro de mecanizado CNC	0.08
32		Desbaste del lado 2 de la plancha de 15mm de espesor.	-Fresa Diam. 8mm.	-Centro de mecanizado CNC	3
33		Recolectar las piezas luego de terminar el mecanizado.			0,5
34		Esmerilar y dar la forma de la pieza.	-Playo	-Esmeril	0,5
Tiempo total en (h)					18,36

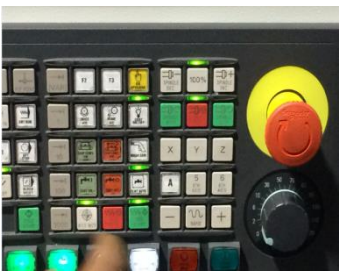
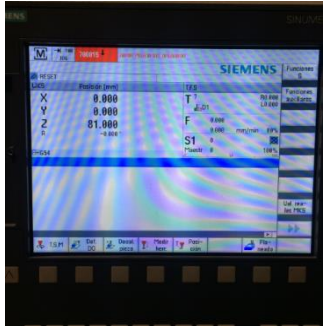




Realizado por: Joel Lliguay 2018




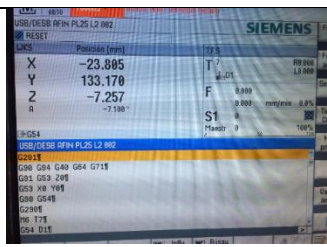
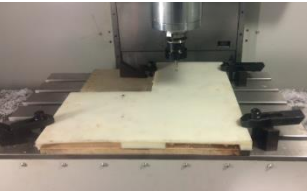

Fuente: Autor

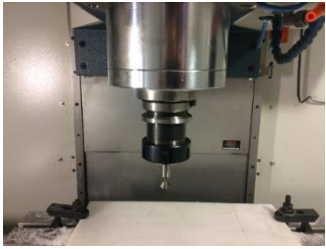




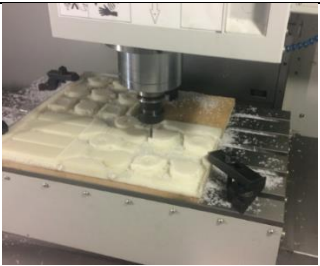
5.2.3 Mecanización de la plancha de Grilon de 25mm de espesor



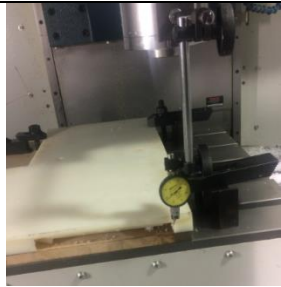

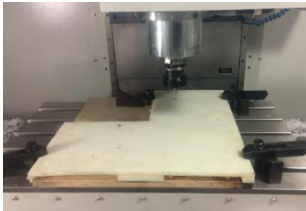
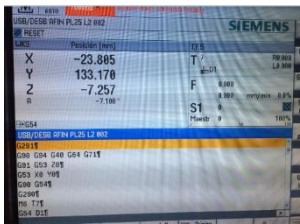
Tabla 15-5: Descripción de los procesos de fresado de la plancha de grilon de 25mm




Paso #	Fotografía	Proceso	Herramientas	Maquinaria	Horas
1		Verificar la caja del medidor y activar los breakers necesarios.	-Desarmador estrella.		0.08
2		Verificar los componentes del aire y del filtro regulador estén bien conectados y funcionales.		-Centro de mecanizado CNC	0.08
3		Controlar la presión del compresor (25psi)			0.016
4		Encender la máquina.		-Centro de mecanizado CNC	0.016

5		Quitar paro de emergencia.		-Centro de mecanizado CNC	0.016
6		Verificar la pantalla del centro de mecanizado para observar el estado de éste.		-Centro de mecanizado CNC	0.08
7		Escuadrado de la plancha de 25mm espesor en la mesa del centro de mecanizado.		-Centro de mecanizado CNC	0.16
8		Colocación de las bridas de sujeción.	-Bridas	-Centro de mecanizado CNC	0.16
9		Preparar el portaherramientas con la fresa.	- Portaherramientas -Fresa Diam. 8mm. -Llaves de ajuste	-Centro de mecanizado CNC	0.016
10		Colocar el portaherramientas en el carrusel.	- Portaherramientas -Fresa Diam. 8mm.	-Centro de mecanizado CNC	0.016

11		Encontrar el cero pieza. $X=0$ $Y=0$ $Z=0$	-Reloj verificador	-Centro de mecanizado CNC	0.25
12		Enviar la línea de códigos con las operaciones de la 1 cara.	-Flash-memory computadora	-Centro de mecanizado CNC	0.08
13		Desbaste de la cara 1 de la plancha con todas las operaciones del mecanizado para las piezas.	-Fresa Diam. 8mm.	-Centro de mecanizado CNC	4,5
14		Enviar la línea de códigos programado con las operaciones de cola de milano con la fresa de 8mm.	-Flash-memory computadora	-Centro de mecanizado CNC	0.08
15		Preparar el portaherramientas con la fresa y volver a calibrar en el eje $z=0$ para devastar guías para realizar la operación de cola de milano.	- Portaherramientas -Fresa Diam. 8mm. -Llaves de ajuste	-Centro de mecanizado CNC	1
16		Preparar el portaherramientas con la fresa cola milano	- Portaherramientas -Llaves de ajuste		0.016

17		Colocar en el carrusel y volver a calibrar en el eje z=0	-Fresa Cola de milano. 16x60mm.	-Centro de mecanizado CNC	0.16
18		Enviar la línea de códigos programado con las operaciones de cola de milano.	-Flash-memory computadora	-Centro de mecanizado CNC	0.08
19		Desbaste programado para realizar la operación de cola de milano.	-Fresa Cola de milano. 16x60mm.	-Centro de mecanizado CNC	2
20		Punteado previo al Taladrado.	-Broca de centros	-Centro de mecanizado CNC	0.16
21		Preparar el portaherramientas con la broca y volver a calibrar en el eje z=0	- Portaherramientas -Broca diam.12mm, -Llaves de ajuste	-Centro de mecanizado CNC	0.08
22		Taladrado con las brocas correspondientes.	-Broca diam.12mm, -Broca Diam. 5mm,	-Centro de mecanizado CNC	1

23		Una vez terminado la 1 cara todas las operaciones designadas procedemos a preparar la 2 cara para iniciar las operaciones de mecanizado.		-Centro de mecanizado CNC	0.08
24		Escuadrado de la plancha de 25mm espesor en la mesa del centro de mecanizado.		-Centro de mecanizado CNC	0.16
25		Colocación de las bridas de sujeción.	-Bridas	-Centro de mecanizado CNC	0.16
26		Encontrar el cero pieza. X=0 Y=0 Z=0	-Reloj verificador	-Centro de mecanizado CNC	0.25
27		Preparar el portaherramientas con la fresa y volver a calibrar en el eje z=0 para devastar todas las operaciones programadas en el lado 2 de la plancha	- Portaherramientas -Fresa Diam. 8mm. -Llaves de ajuste	-Centro de mecanizado CNC	1
28		Enviar la línea de códigos programado con las operaciones de cola de milano.	-Flash-memory computadora	-Centro de mecanizado CNC	0.08


29		Desbaste del lado 2 de la plancha de 25mm de espesor.	-Fresa Diam. 8mm.	-Centro de mecanizado CNC	4
30		Recolectar las piezas luego de terminar el mecanizado			0.5
31		Esmerilar y dar la forma de la pieza.	-Playo	-Esmeril	1
Tiempo total en (h)					17,436




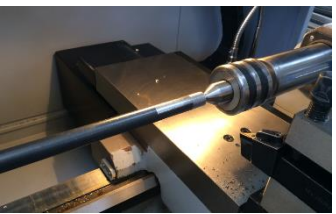


Realizado por: Joel Lliguay 2018




Fuente: Autor

5.2.4 Mecanización de los ejes.

Tabla 16-5: Descripción de los procesos de mecanizado de los ejes

Paso #	Fotografía	Proceso	Herramientas	Maquinaria	Horas
1		Preparar el eje			0,25

2		Verificar el torno, preparar al eje para colocar el contrapunto.	-Contrapunto -Taladro	-Torno	0,25
3		Colocar la cuchilla y el contrapunto.	-Contrapunto -Cuchilla	-Torno	0.25
4		Enviar el código g para realizar las operaciones asignadas	-Computadora -Flash memory	-Torno	0,5
5		Desbastar el eje de 19 mm a 17 mm.	-Contrapunto -Cuchilla	-Torno	0.25
6		Desbastar el eje de 19 mm a 12 mm.	-Contrapunto -Cuchilla	-Torno	0.25
7		Cortar los ejes a la medida requerida.	-Disco de corte	-Cortadora de disco	0,16




8		Realizar las perforaciones.	-Broca de 11 mm y de 5.5 mm	-Centro de mecanizado CNC.	0,25
9		Realizar los chaveteros	-Fresa de 5 mm.	-Centro de mecanizado CNC	1
10		Recolección y acabados de las piezas.			0,16
Tiempo total en (h)					3,32

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

5.2.5 Construcción de las chavetas

Tabla 17-5: Descripción de los procesos de construcción de las chavetas

Paso #	Fotografía	Proceso	Herramientas	Maquinaria	Horas
1		Cortar la platina de acuerdo con el largo y ancho de los chaveteros de los respectivos ejes	-Sierra de arco	-Amoladora	4
2		Dar forma a las chavetas.		--Amoladora	4
3		Comprobar medidas y colocar las chavetas en sus respectivos chaveteros.			1
			Tiempo total en (h)		9

Realizado por: Joel Lliguay 2018

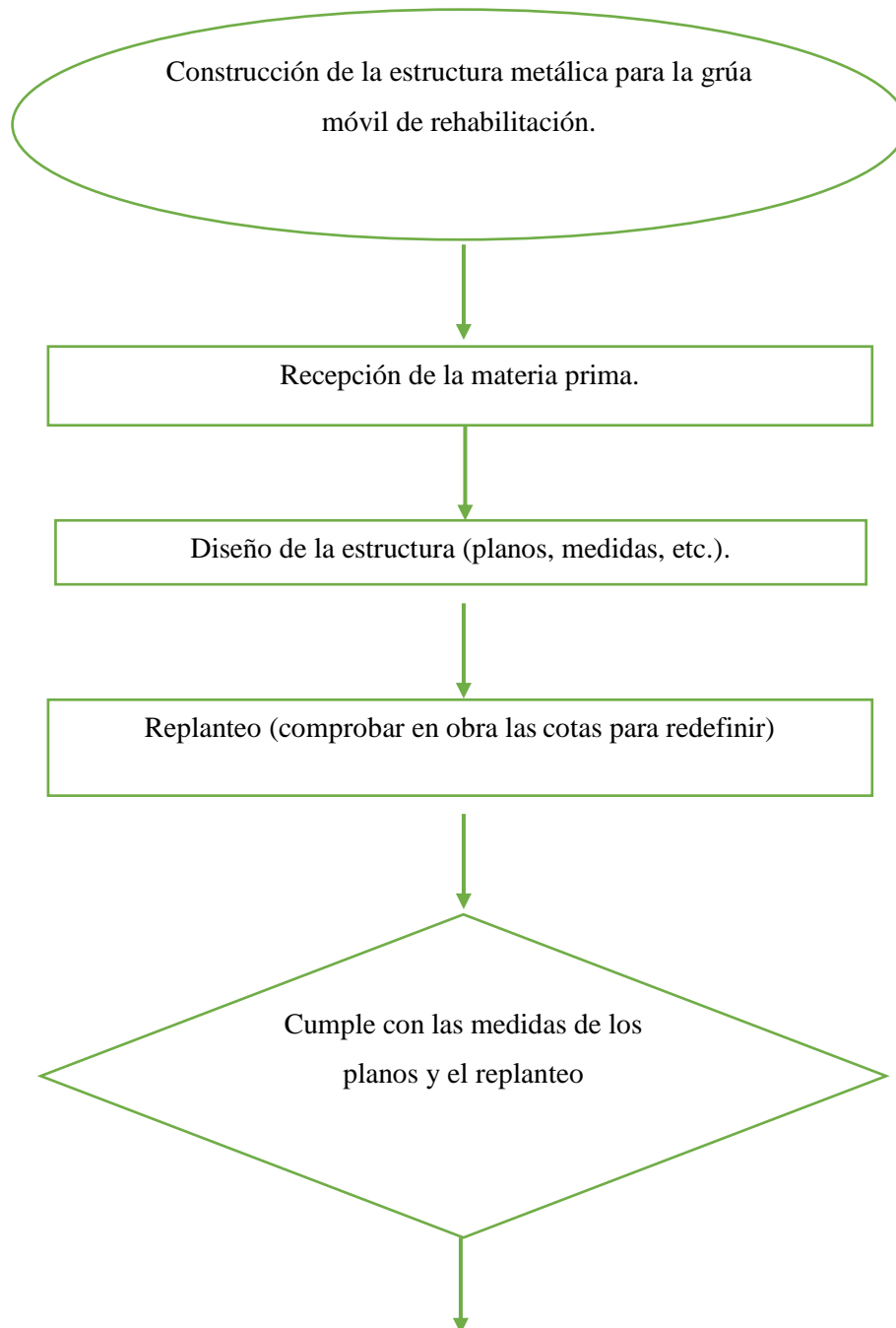
Fuente: Autor

5.3 Construcción de la grúa de rehabilitación móvil y el mecanismo de cadera

El diagrama de bloques es la representación gráfica del funcionamiento interno de un sistema, que se hace mediante bloques y sus relaciones, y que, además, definen la organización de todo el proceso interno, sus entradas y sus salidas.

5.3.1 Diagrama de bloques de procesos para la construcción de la grúa rehabilitación móvil

Es un diagrama utilizado para indicar la manera en la que se elabora cierto producto, especificando la materia prima, la cantidad de procesos y la forma en la que se presenta el producto terminado.



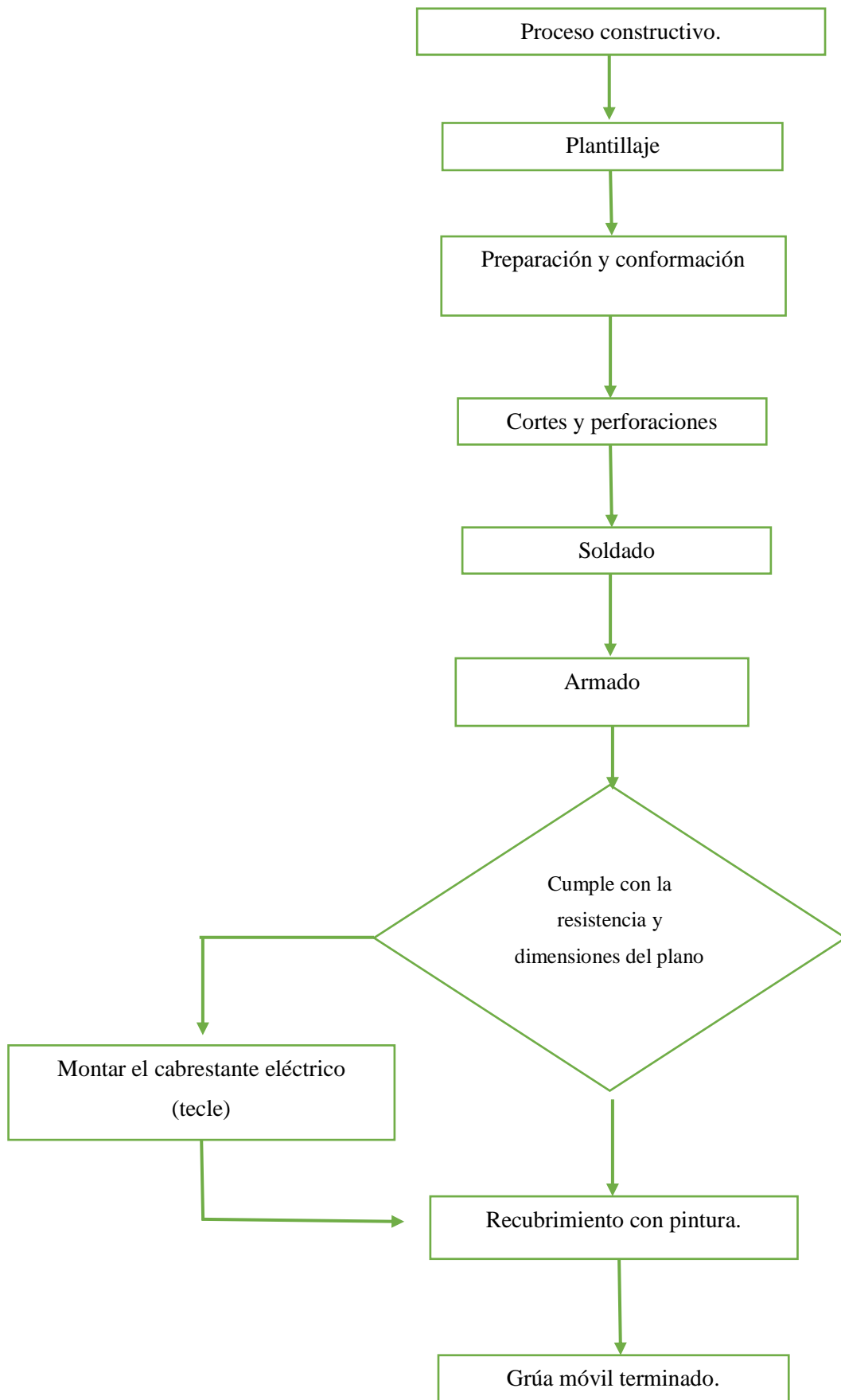












Figura 8-5: Diagramas de procesos







Fuente: Autor

5.3.2 Construcción de la grúa de rehabilitación móvil







Tabla 18-5: Descripción de los procesos de construcción de la grúa móvil

Paso #	Fotografía	Proceso	Herramientas	Maquinaria	Horas
1		Revisión de planos y corte de los tubos rectangulares y cuadrados.	-Sierra de arco -Escuadras -Flexómetro	-Cortadora de metal.	1
2		Destaje de los ángulos de inclinación en los tubos rectangulares	-Sierra de arco -Escuadras -Flexómetro	-Cortadora de metal.	1
3		Ubicar en dos partes los componentes de la estructura en el lugar a soldar.	-Escuadras -Flexómetro		0.5
4		Posicionar el porta-electrodos y la pinza de masa.	-Electrodo	-Soldadora por arco eléctrico	0.10
5		Soldar los componentes de la primera parte de la estructura	-Electrodo -Escuadras -Flexómetro	-Soldadora por arco eléctrico	2

6		Soldar soportes de tubo cuadrado en la columna de la primera parte de la estructura.	-Electrodo -Escuadras -flexómetro	-Soldadora por arco eléctrico	0.5
7		Realizar los mismos procesos para la segunda parte de la estructura.	-Electrodo -Escuadras -Flexómetro	Soldadora por arco eléctrico	2.6
8		Levantar las dos partes de la estructura ya ensamblada y verificar dimensiones.	-Flexómetro		0.10
9		Colocar y soldar la viga que une las dos partes de la estructura.	-Electrodo -Escuadras -Flexómetro	-Soldadora por arco eléctrico	0.5
10		Realizar las perforaciones en los tubos de la puerta regulable para el soporte del exoesqueleto.	-Flexómetro -Broca -Sierra de arco	- Taladro	0.5






11		Soldar las bisagras a la columna de la grúa móvil.	-Electrodo -Escuadras -Flexómetro -Bisagras -Sierra de arco	-Soldadora por arco eléctrico	0.5
12		Soldar las bisagras a los tubos cuadrados de la puerta regulable para soporte del exoesqueleto	-Electrodo -Escuadras -Flexómetro -Bisagras	-Soldadora por arco eléctrico	2.5
13		Realizar las perforaciones en las orejas para la puerta del soporte del exoesqueleto.	-Flexómetro -Broca -Sierra de arco	- Taladro	0.5
14		Soldar las orejas y tubos para formar la puerta de soporte del exoesqueleto.	-Electrodo -Escuadras -Flexómetro -Sierra de arco	-Soldadora por arco eléctrico	0.60
15		Soldar tope en la oreja inferior para que no baje la puerta y se mantenga en posición central.	-Electrodo -Escuadras -Flexómetro -Sierra de arco	-Soldadora por arco eléctrico	0.5
16		Preparar la correa en donde se va a deslizar y colocar el mecanismo de cadera y añadimos orejas perforadas y tubos para acoplar en la puerta soporte.	-Electrodo -Sierra de arco -Escuadras -Flexómetro -Pernos -Broca	-Soldadora por arco eléctrico - Taladro	1

17		Realizar un destaje para facilitar el desplazamiento y regulación del mecanismo de cadera.	-Flexómetro	-Amoladora	0.10
18		Soldar la base para las 4 ruedas industriales.	-Electrodo -Escuadras -Flexómetro -Sierra de arco	-Soldadora por arco eléctrico.	1
19		Soldar las dos ruedas industriales móviles en la parte frontal de la estructura.	-Electrodo -Escuadras -Flexómetro	-Soldadora por arco eléctrico.	0.30
20		Soldar las dos ruedas industriales fijas en la parte trasera de la estructura.	-Electrodo -Escuadras -Flexómetro	-Soldadora por arco eléctrico.	0.30
21		Cortar los tubos para los tubos de empuñadura de apoyo deslizables.	-Flexómetro -Sierra de arco	-Cortadora de tubos	0.30
22		Soldar la turca en el extremo del tubo para realizar el tubo desmontable. Son (2) componentes.	-Electrodo -Escuadras -Flexómetro	-Soldadora por arco eléctrico.	0.5

23		Preparar el perno para acoplar a la tureca prepara para el tubo de empuñadura. Son (2) componentes.	-Electrodo -Escuadras -Flexómetro -Tuerca -Sierra de arco	-Soldadora por arco eléctrico.	1
24		Preparar el canal donde se va a deslizar el perno juntamente con el tubo. Son (2) componentes.	-Electrodo -Escuadras -Flexómetro -Sierra de arco	-Soldadora por arco eléctrico.	0.60
25		Perforar las regulaciones del canal.	-Flexómetro -Broca -Sierra de arco	- Taladro	0.25
26		Soldar el mecanismo de regulación en el tubo de la estructura.	-Electrodo -Escuadras -Flexómetro	-Soldadora por arco eléctrico -Taladro	0.45
27		Montar el mecanismo de regulación para los tubos de empuñadura de apoyo deslizables	-Electrodo	-Soldadora por arco eléctrico	0.15
28		Soldar los soportes del cabrestante (tecle) en la viga de la estructura.	-Electrodo -Escuadras -Flexómetro	-Soldadora por arco eléctrico	0.30

29		Soldar ángulos de refuerzos en los extremos de la viga de la estructura para reforzar las cargas en la misma.	-Electrodo -Escuadras -Flexómetro -Sierra de arco	-Soldadora por arco eléctrico	0.20
30		Montar el cabrestante y tapar el mismo para resoldar los soportes.	-Llave de perno ajustable		0.15
31		Resoldar los soportes del cabrestante.	-Electrodo	-Soldadora por arco eléctrico	0.2
32		Doblar y cortar las orejas para montar el cable.	-Sierra de arco -Escuadras -Flexómetro		0.25
33		Soldar las orejas en la subestructura para montar el cable.	-Electrodo	-Soldadora por arco eléctrico	0.15

34		Doblar y cortar las orejas para montar el cable del cabrestante.	-Sierra de arco -Escuadras -Flexómetro		0.25
35		Soldar las orejas en el tubo para sujetar el arnés.	-Electrodo	-Soldadora por arco eléctrico	0.15
36		Resoldar toda la estructura cuidando la deformación por el calor	-Electrodo	-Soldadora por arco eléctrico	1.5
37		Pulir la estructura	-Piedra de pulir	Amoladora	0.45
38		Limpiar la estructura de la corrosión del material y limpiar las escorias de soldadura	-Lijas -Espátula -Limas		0.45

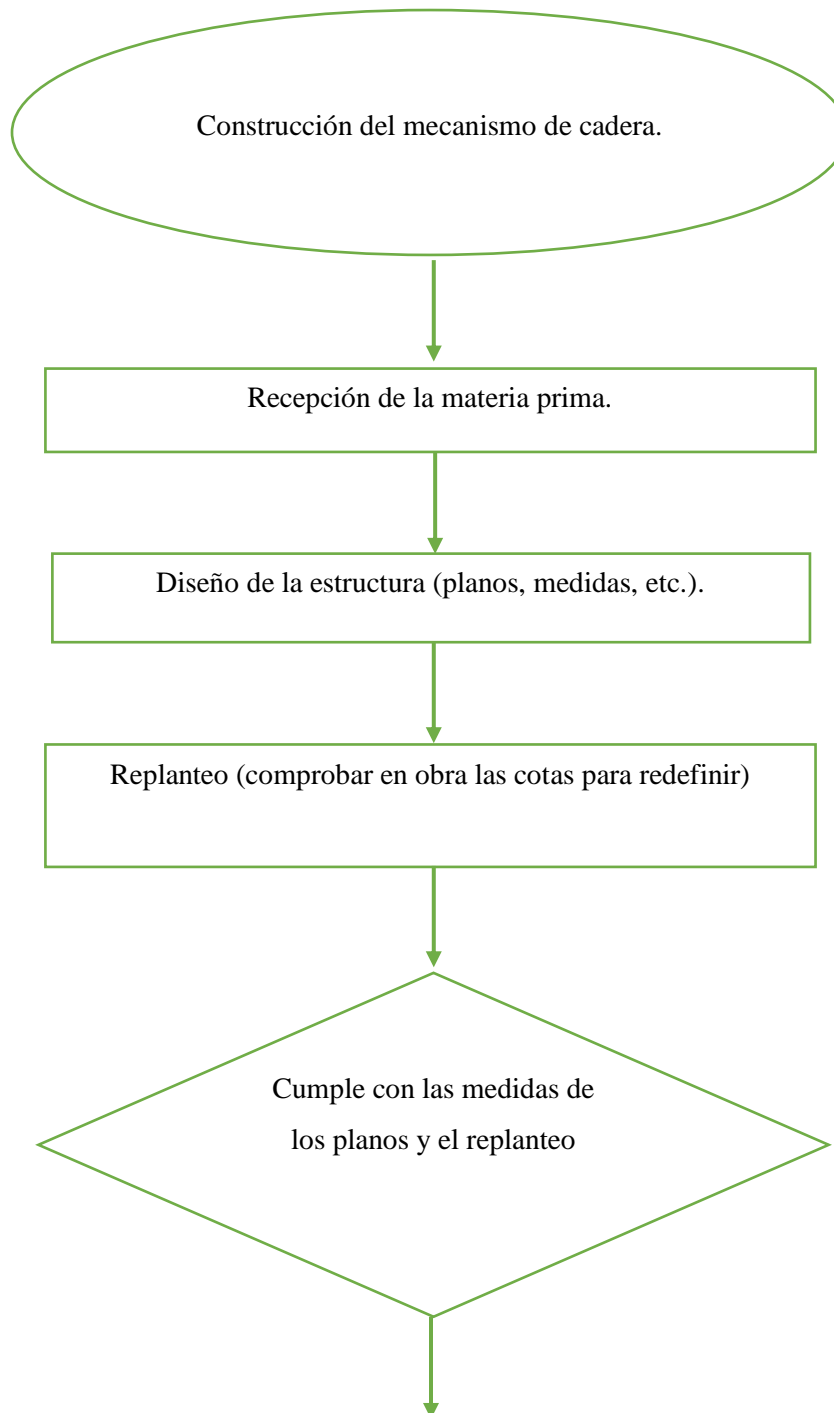
39		Macillar y lijar las partes en donde se encuentran fallas de soldaduras y del material.	-Macilla -Secante -Lijas		1
40		Fondear la estructura para recubrir con pintura		-Compresor	1.5
41		Fondear los componentes para recubrir con pintura		-Compresor	1.5
42		Pintar la estructura de la grúa de rehabilitación.		-Compresor	1.5
43		Pintar los componentes de la grúa móvil de rehabilitación.		-Compresor	1.5
Tiempo total en (h)					30,4

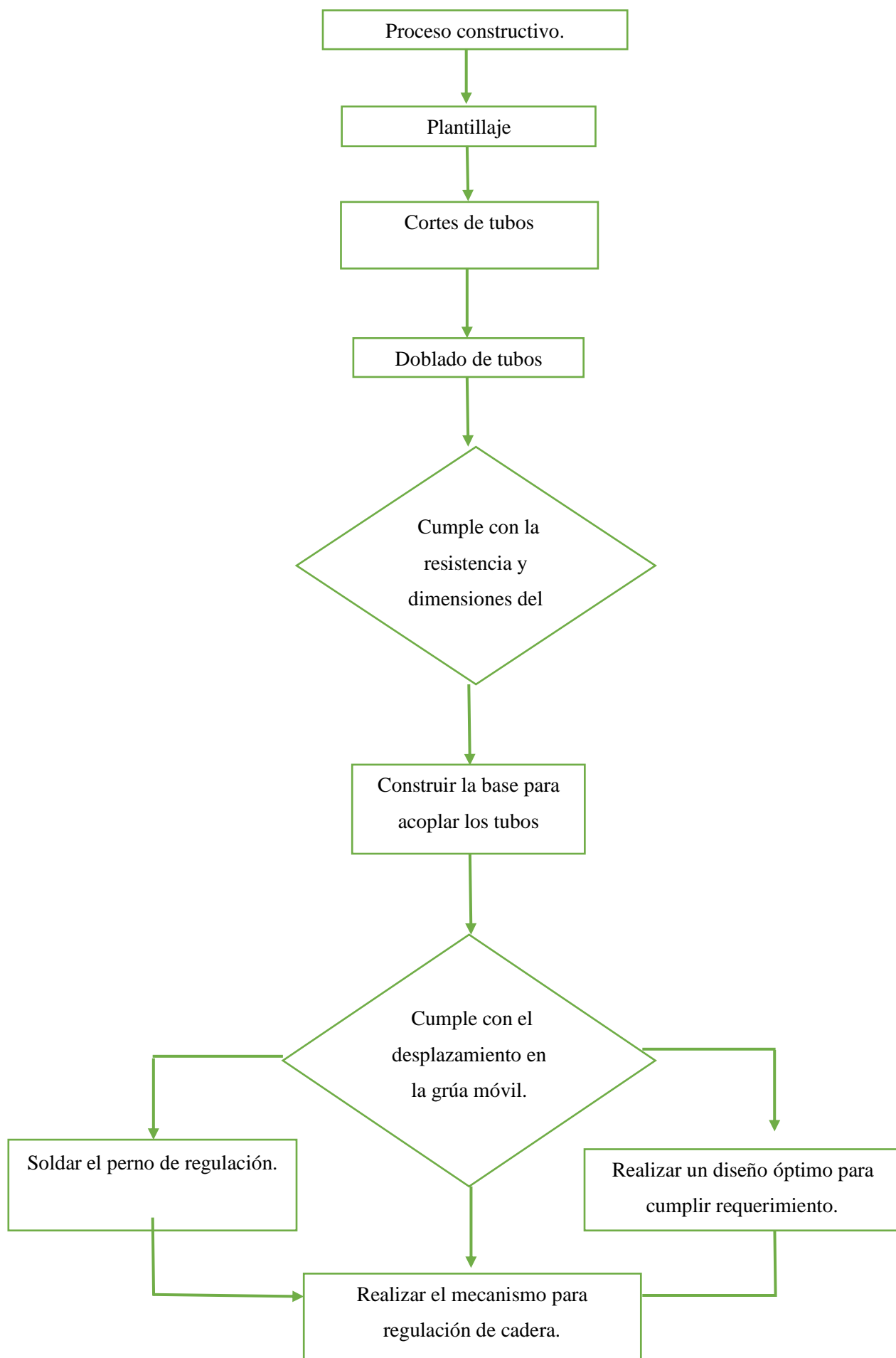
Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

5.3.3 Diagrama de bloques de procesos para la construcción del mecanismo de cadera

Es un diagrama utilizado para indicar la manera en la que se elabora cierto producto, especificando la materia prima, la cantidad de procesos y la forma en la que se presenta el producto terminado





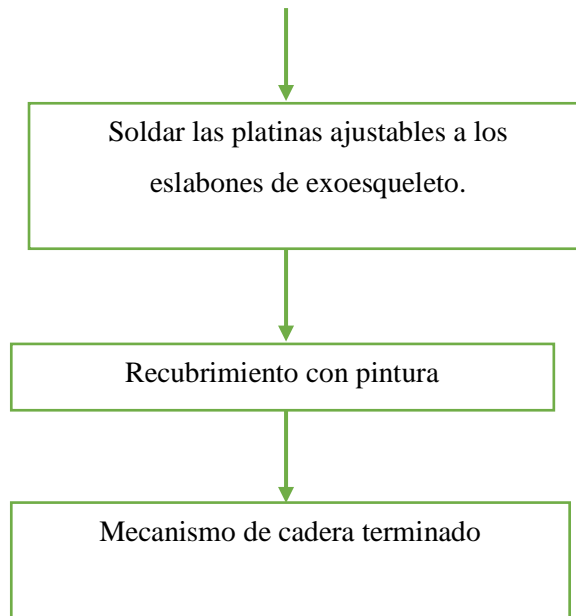















Figura 9-5: Diagramas de procesos
Fuente: Autor


5.3.4 Construcción del mecanismo de cadera

Tabla 19-5: Descripción de los procesos de construcción del mecanismo de cadera

Paso #	Fotografía	Proceso	Herramientas	Maquinaria	Horas
1		Lectura de planos y Corte de los tubos redondos	-Sierra de arco -Escuadras -Flexómetro		0.30
2		Doblado de los tubos primera curvatura	-Flexómetro	-Dobladora de tubos manual	1

3		Doblado de los tubos segunda curvatura.	-Escuadras -flexómetro	-Dobladora de tubos hidráulica	0.5
4		Construir la base regulable donde soporta los tubos.	-Electrodo -Escuadras -Flexómetro	-Soldadora por arco eléctrico	1
5		Soldar los tubos para regular y desplazar el mecanismo de cadera	-Electrodo -Escuadras -Flexómetro	-Soldadora por arco eléctrico	2
6		Ensamblar y verificar el deslizamiento de los tubos	-Sierra de arco -Escuadras -flexómetro		0.20
7		Controlar las dimensiones regulables de cadera.			0.20
8		Soldar el perno y platina entre los tubos que sirve para regular el mecanismo de cadera	-Electrodo -Escuadras -Flexómetro -Perno	-Soldadora por arco eléctrico	1

9		Realizar un sistema de regulación mediante arandelas y tuercas.	-Electrodo -Escuadras -Flexómetro	-Soldadora por arco eléctrico	1
10		Soldar una agarradera en el perno para girar el mecanismo de regulación		-Soldadora por arco eléctrico	0.30
11		Realizar perforaciones en platinas para soporte de motores seleccionados para la cadera.	-Flexómetro -Broca -Sierra de arco	- Taladro	0.5
12		Cortar las platinas para la abrazadera.	-Sierra de arco -Escuadras -flexómetro		0.08
13		Soldar las abrazaderas de los motores de la cadera	-Electrodo -Escuadras -Flexómetro	-Soldadora por arco eléctrico	0.5

14		Soldar y perforar las platinas para sujetar el acople de la cadera.	-Electrodo -Escuadras -Flexómetro -Broca	-Soldadora por arco eléctrico -Taladro	0.5
15		Macillar, lijar los desperfectos y limpiar la corrosión del mecanismo.	-Macilla -Secante -Lijas		0.45
16		Aplicar fondo al mecanismo de cadera para recubrir con pintura.		-Compresor	0.5
17		Recubrir con pintura blanca al mecanismo de cadera		-Compresor	0.5
Tiempo total en (h)					10,53

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

5.3.5 *Flujogramas de construcción*

Los flujogramas de construcción nos indican el orden a seguir durante la construcción, y se basan en la numeración descrita en los procedimientos de construcción.

5.3.5.1 Flujograma de construcción del exoesqueleto con la plancha de 15 mm

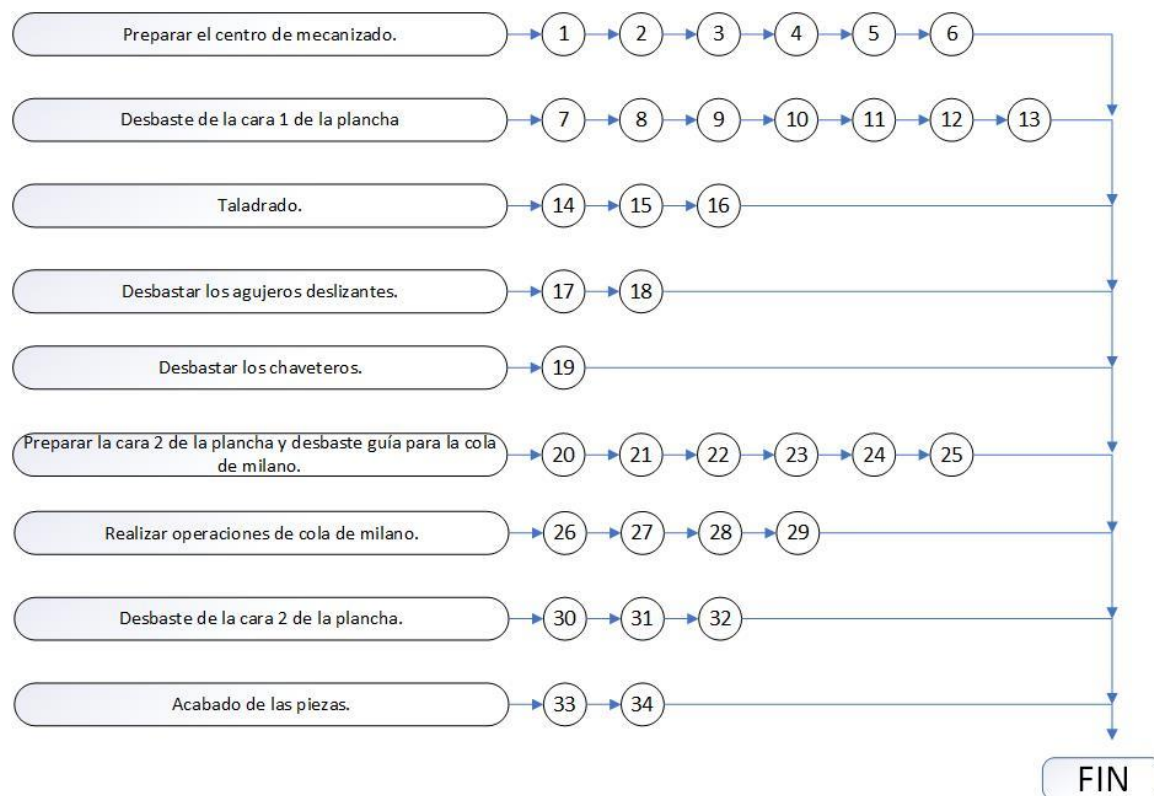


Figura 10-5: Flujograma de construcción del exoesqueleto con la plancha de 15 mm.

Fuente: Autor

5.3.5.2 Flujograma de construcción del exoesqueleto con la plancha de 25 mm

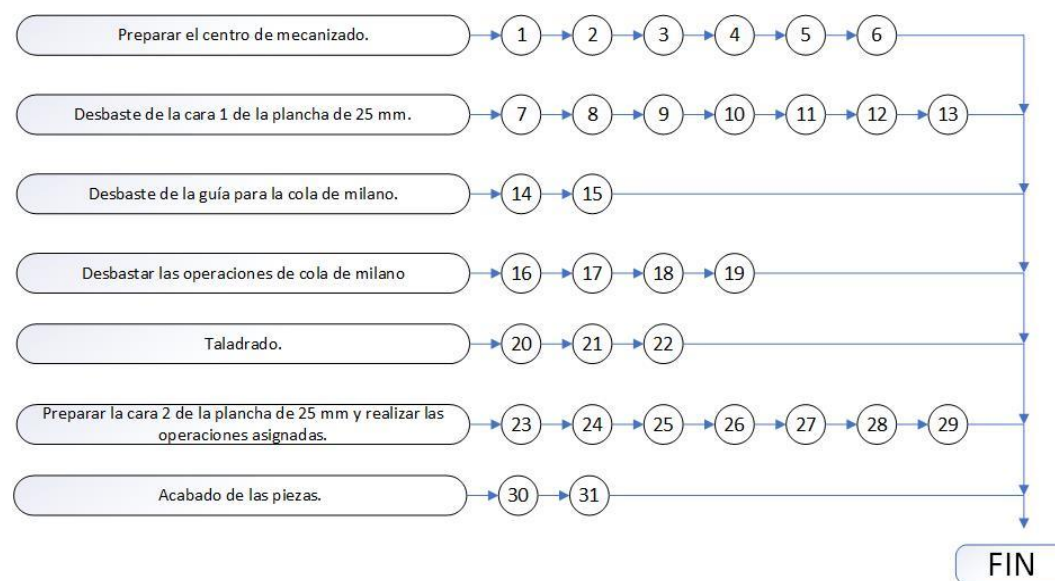


Figura 11-5: Flujograma de construcción del exoesqueleto con la plancha de 25 mm.

Fuente: Autor

5.3.5.3 Flujograma de construcción de los ejes

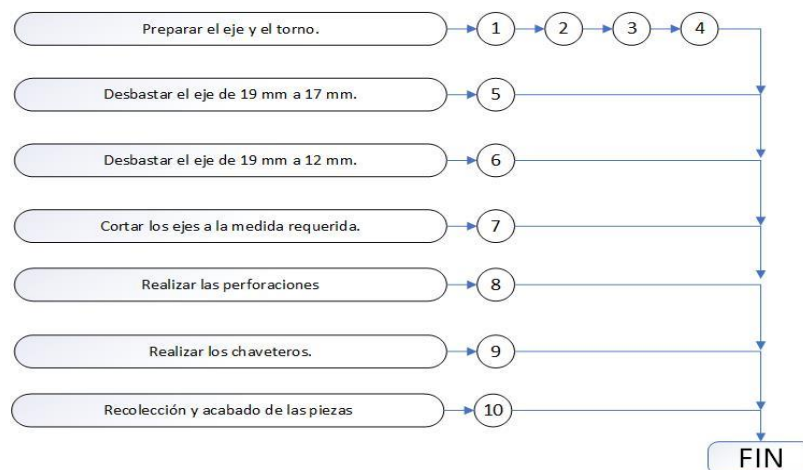


Figura 12-5: Flujograma de construcción de los ejes

Fuente: Autor

5.3.5.4 Flujograma de construcción de las chavetas

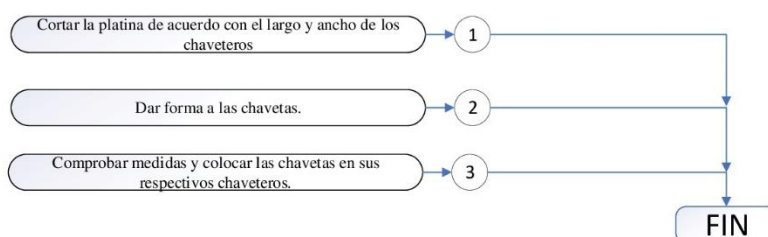


Figura 13-5: Flujograma de construcción de las chavetas

Fuente: Autor

5.3.5.5 Flujograma de construcción de la grúa de rehabilitación móvil

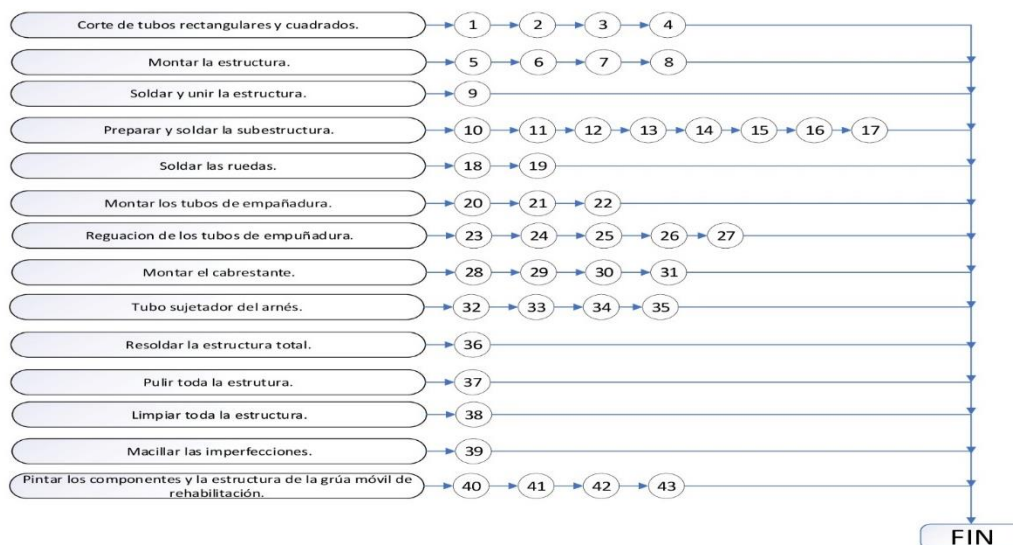


Figura 14-5: Flujograma de construcción de la grúa de rehabilitación

Fuente: Autor

5.3.5.6 Flujograma de construcción del mecanismo de cadera

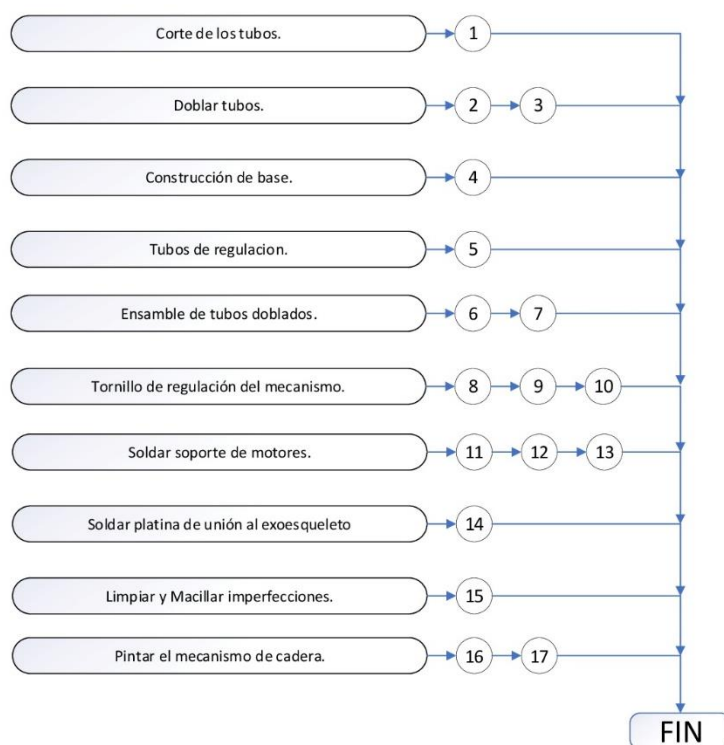



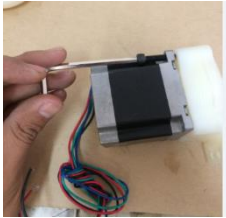



Figura 15-5: Flujograma de construcción del mecanismo de cadera


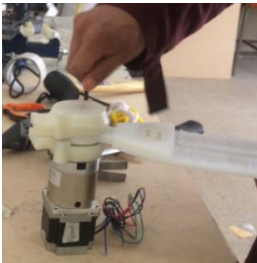

Fuente: Autor

5.3.6 Ensamble del conjunto de exoesqueleto

Tabla 20-5: Ensamble del conjunto de exoesqueleto motores, eslabones, articulaciones y componentes.

Símbolo	Fotografía	Operación	Horas
M1		Colocar los rodamientos en las articulaciones que no se conectan a los motores.	0,25
M2		Colocar el motor en las articulaciones que se ajustan por pernos internamente.	1


M3		Ajustar los pernos con la llave hexagonal.	1
M4		Colocar los motores en las articulaciones que se ajustan internamente.	1
M5		Colocar los ejes y las chavetas en los eslabones de la articulación.	1
M6		Colocar los anillos de sujeción en los ejes.	0,5
M7		Colocar los rodamientos en las articulaciones faltantes y acoplar los eslabones en las articulaciones.	2






M8		Colocar lubricante y comprobar su movimiento y el buen ajuste de sus componentes.	1
M9		Colocar la segunda tapa para ajustar el mecanismo.	1
M10		Ajustar los pernos con llave hexagonal.	1
Tiempo total en (h)			9,75






Realizado por: Joel Lliguay 2018




Fuente: Autor

Tabla 21-5: Ensamble de la grúa móvil de rehabilitación

Símbolo	Fotografía	Operación	Horas
M11		Montar el cabrestante y ajustar los pernos en el lugar respectivo.	0,5

M12		Se coloca las tapas o regatones en los tubos.	0,25
M13		Montar la base de la subestructura desmontable sujetadora del exoesqueleto.	0,16
M14		Montar los pernos y ajustar.	0,16
M15		Montar la estructura que sostiene el exoesqueleto y los pernos para articular la subestructura.	0,16
M16		Lubricar y ajustar los pernos para la articulación de la subestructura.	0,08

M17		Montar el cable y las grapas para sujetar carga cuando se coloque el exoesqueleto.	0,16
M18		Lubricar el picaporte se asegura a la subestructura y a la grúa móvil.	0,08
M19		Montar el perno deslizante en el canal.	0,08
M20		Lubricar el perno deslizante.	0,08
M21		Montar los tubos de empuñadura.	0,08






M22		Colocar el perno de ajuste regulador de los tubos de empuñadura.	0,08
M23		Montar el tubo sujeta arnés en el cable del cabrestante.	0,08
M24		Colocar los eslabones del arnés en el tubo sujetador.	0,08
Tiempo total en (h)			2,19



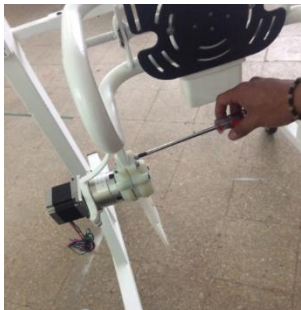


Realizado por: Joel Lliguay 2018




Fuente: Autor

Tabla 22-5: Ensamble del conjunto de la cadera y el exoesqueleto

Símbolo	Fotografía	Operación	Horas
M25		Montar el tubo doblado de la cadera en el perno regulador.	0,08

M26		Montar el segundo tubo doblado de la cadera en el perno regulador.	0,08
M27		Lubricar y ajustar el mecanismo.	0,08
M28		Montar la cadera en la subestructura de la grúa de rehabilitación móvil.	0,08
M29		Lubricar el canal deslizante que soporta la cadera.	0,08
M30		Fijar una posición del mecanismo de cadera.	0,08

M31		Colocar el perno sujetado entre la subestructura y la cadera.	0,08
M32		Colocar el espaldar en el mecanismo de cadera.	0,08
M33		Montar la pierna ensamblada en el lado derecho	0,25
M34		Colocar los pernos en la abrazadera sujetador del motor.	0,08
M35		Ajustar los pernos.	0,08

M36		Montar la pierna ensamblada en el lado derecho.	0,25
M37		Ajustar los pernos.	0,25
M38		Montar los eslabones de regulación, pantorrillas y pies, además de los componentes de funcionamiento para los motores como son los drivers y fuentes.	1
		Tiempo total en (h)	2,55

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

5.3.7 *Flujograma del ensamble del conjunto de exoesqueleto*

El flujograma indica las operaciones de montaje y ensamble del conjunto en general.

5.3.7.1 Flujograma de montaje en general.

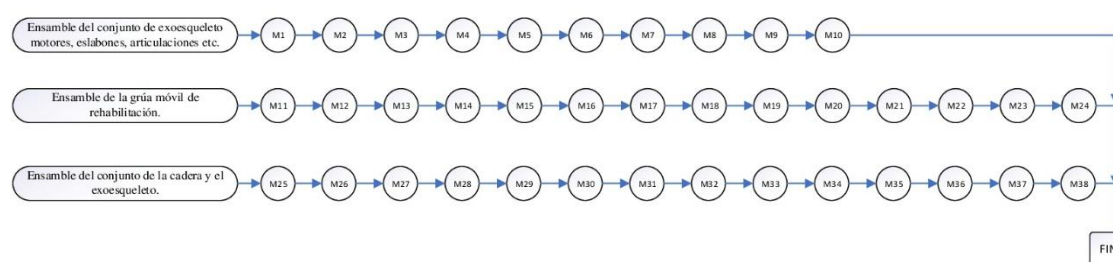


Figura 16-5: Flujograma de montaje en general

Fuente: Autor

5.3.7.2 Tiempos de montaje y construcción de la máquina

Indica los tiempos de montaje y construcción del prototipo de exoesqueleto.

Tabla 23-5: Tiempo total de la construcción

Tiempo de montaje	14, 49 horas
Tiempo de construcción	89.046 horas
Tiempo total de construcción del prototipo de exoesqueleto.	103.536 horas

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

El tiempo total de construcción y montaje del prototipo de exoesqueleto 103.536 horas que aproximadamente equivale a 14 días laborables analizando que un día laboral conste de 8 horas diarias

5.3.7.3 Personal laboral

El grupo de investigación GIEBI trabajo de una manera eficaz entre todos sus miembros, pero en el área de construcción se asignó personal laboral para este prototipo, es importante aclarar el número de trabajadores ya que en base a este número puede variar el tiempo de construcción del prototipo y se asignó de la siguiente manera.

- *Construcción del exoesqueleto*

Para la construcción y mecanizado del exoesqueleto se tuvo a disposición de tres personas

Joel Lliguay: Tesista y miembro del grupo de investigación.

Miguel Escobar: Encargado del centro de mecanizado y miembro del grupo de investigación.

Alex Pulla: Pasante del grupo de investigación

- *Construcción de la grúa de rehabilitación móvil*

Joel Lliguay: Tesista y miembro del grupo de investigación.

Luis Lliguay: Ingeniero industrial y operario del taller de metalmecánica.

- *Ensamble del prototipo de exoesqueleto*

Joel Lliguay: Tesista y miembro del grupo de investigación.

En conclusión, el proyecto se finalizó con un total de cuatro trabajadores y así se justifica el numero de 103.536 horas invertidas.



5.4 Pruebas y análisis de resultados



5.4.1 *Análisis y resultados de las piezas fabricadas*

Se verifica las dimensiones, acabados, forma y la resistencia de la pieza entre el diseño inicial y el producto final con instrumentos de medición.




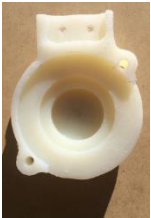
Tabla 24-5: Análisis y resultados de las piezas fabricadas

5.4.1.1 *Articulación de cadera*





Derecha	Izquierda	Análisis de resultados	Aceptación Si / No
		Se verifica las dimensiones y muestran una alta exactitud, las perforaciones muestran las tolerancias asignadas y la forma de la pieza es aceptable. En la unión de los eslabones muestra una rugosidad y acabados desfavorables pero aceptables. La pieza es resistente.	SI

		Se verifica las dimensiones y muestran una alta exactitud, las perforaciones muestra las tolerancias asignadas y la forma de la pieza es aceptable. En la unión de los eslabones muestra una rugosidad y acabados desfavorables pero aceptables. La pieza es resistente.	SI
---	---	--	----





5.4.2 Articulación de rodilla

Derecha	Izquierda	Análisis de resultados	Aceptación Si / No
		Se verifica las dimensiones y muestran una alta exactitud, las perforaciones muestra las tolerancias asignadas y la forma de la pieza es aceptable. La pieza es resistente.	SI
		Se verifica las dimensiones y muestran una alta exactitud, las perforaciones muestra las tolerancias asignadas y la forma de la pieza es aceptable. La pieza es resistente.	SI

5.4.2.1 Articulación tobillo

Derecha	Izquierda	Análisis de resultados	Aceptación Si / No
		Se verifica las dimensiones y muestran una alta exactitud, las perforaciones muestra las tolerancias asignadas y la forma de la pieza es aceptable. La pieza es resistente.	SI
		Se verifica las dimensiones y muestran una alta exactitud, las perforaciones muestra las tolerancias asignadas y la forma de la pieza es aceptable. La pieza es resistente.	SI





5.4.2.2 Eslabón muslo

Derecha	Izquierda	Análisis de resultados	Aceptación Si / No
		Los eslabones superiores muestran la forma diseñada, tiene una gran exactitud en sus dimensiones, las perforaciones muestran las tolerancias asignadas. La pieza es resistente. Resultó una pequeña perforación no asignada, en el eslabón izquierdo debido al código de programación.	SI
		Los eslabones inferiores muestran la forma diseñada, tiene una gran exactitud en sus dimensiones, las perforaciones muestran las tolerancias asignadas. En el eslabón izquierdo hubo un corte por la mala sujeción del material, pero se macillo y muestra una resistencia aceptable.	SI

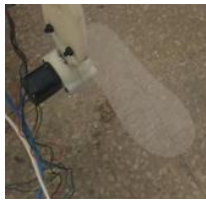

5.4.2.3 Eslabón pantorrilla

Derecha	Izquierda	Análisis de resultados	Aceptación Si / No
		Los eslabones superiores muestran la forma diseñada, tiene una gran exactitud en sus dimensiones, las perforaciones muestran las tolerancias asignadas. La pieza es resistente.	SI
		Los eslabones inferiores muestran la forma diseñada, tiene una gran exactitud en sus dimensiones, las perforaciones muestran las tolerancias asignadas. En el eslabón izquierdo hubo un corte por la mala sujeción del material, pero se macillo y muestra una resistencia aceptable.	SI



5.4.2.4 Eslabón tobillo

Derecha	Izquierda	Análisis de resultados	Aceptación Si / No
		Los eslabones del tobillo muestran dimensiones aceptables. Tiene una forma y resistencia aceptable. En el eslabón derecho existe una perforación con falla por la fractura de la broca y se macilló quedando funcional.	SI
		Los eslabones del tobillo muestran dimensiones aceptables. Tiene una forma y resistencia aceptable. En el eslabón derecho existe una perforación con falla por la fractura de la broca y se macilló quedando funcional.	SI


5.4.2.5 Pie

Derecha	Izquierda	Análisis de resultados	Aceptación Si / No
		Se verifica las dimensiones y muestran una alta exactitud, las perforaciones muestra las tolerancias asignadas y la forma de la pieza es aceptable.	SI

5.4.2.6 Ejes y chavetas

Derecha	Análisis de resultados	Aceptación Si / No
	Los ejes cumplen con las dimensiones, tolerancias y resistencia esperada.	SI
	Las chavetas tienen las formas dimensión diseñada para el acople en los chaveteros del eje.	SI

5.4.2.7 Grúa de rehabilitación móvil y mecanismo de cadera

Derecha	Análisis de resultados	Aceptación Si / No
	Ligero, ergonómico cumple con las dimensiones tiene fácil ensamble y soportas cargas elevadas. La grúa muestra una gran resistencia.	SI

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

5.4.3 Pruebas del conjunto del conjunto de exoesqueleto

5.4.3.1 Plan de pruebas de funcionamiento

El plan de pruebas se aplica para verificar y analizar el correcto funcionamiento y desempeño del conjunto de exoesqueleto, y para ello se analizarán las pruebas en vacío y en carga parcial ya que, a plena carga, no será factible con el paciente porque solo es un prototipo y se espera resultados aceptables o caso contrario mostrara un mal funcionamiento.



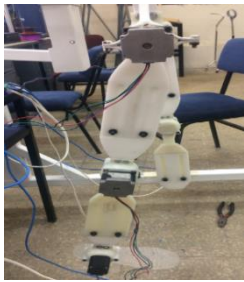
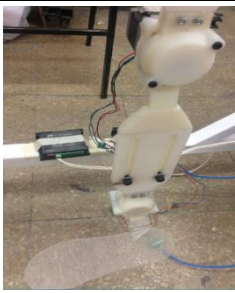
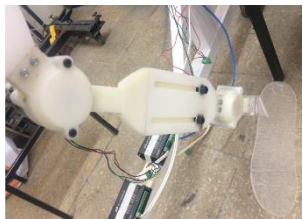
5.4.3.2 Pruebas en vacío

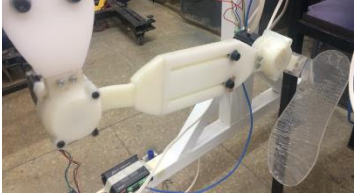


Las pruebas en vacío se las realiza para verificar el funcionamiento de las articulaciones y el montaje de los componentes que conforman el exoesqueleto.

Esta prueba se lo realiza manualmente a diferentes posiciones, sin usar todavía los toques de los motores.



Tabla 25-5: Pruebas en vacío del conjunto del conjunto de exoesqueleto


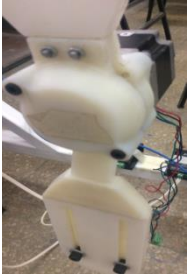
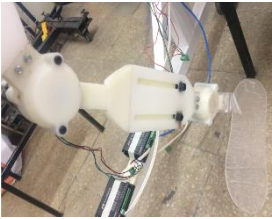
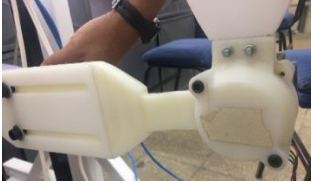


- *Pierna derecha*

Cadera	90		El mecanismo es muy eficaz el rodamiento, el eje están bien ensamblados con los eslabones y motor ya que no existe deslizamientos.
	45		La pierna marcha perfectamente en esa posición y no existe deslizamientos entre el eje y motor.
	-20		La pierna llega a su posición final, hacia la parte de atrás llegando a satisfacer con los topes limitantes el movimiento esperado.
Rodilla	0		La rodilla mantiene su posición inicial, el ensamble de la rodilla es funcional y soporta la pantorrilla y pie.
	-45		Existe una pequeña fricción entre el eslabón y las articulaciones por la rugosidad del eslabón y eso quita eficiencia en su movimiento.

	-90		Llega a su posición final con facilidad.
Tobillos	50		El eslabón del tobillo está muy flojo cuando llega a esa posición, pero cumple con su funcionamiento, esto se debe por un mal ajuste entre el eje con los rodamientos no están bien alineados.
	-30		Llega a su posición final con facilidad.

- *Pierna izquierda*

Cadera	90		El mecanismo es muy eficaz, el rodamiento, el eje están bien ensamblados con los eslabones y motor ya que no existe deslizamientos.
	45		La pierna marcha perfectamente en esa posición y no existe deslizamientos ente el eje y motor.

	-20		La pierna llega a su posición final hacia la parte de atrás llegando a satisfacer con los topes limitantes.
Rodilla	0		La rodilla mantiene su posición inicial, el ensamble de la rodilla es funcional y soporta la pantorrilla y pie.
	-45		La pierna marcha perfectamente en esa posición y no existe deslizamientos ente el eje y motor.
	-90		Llega a su posición final con facilidad
Tobillos	50		Llega a su posición final con un gran rendimiento sin fricción.
	-30		Llega a su posición final con facilidad

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

5.4.3.3 Pruebas con carga parcial

La carga parcial se realiza usando los motores y analizando cómo se comporta el ensamble y si cumple con los objetivos esperados para el prototipo.

Tabla 26-5: Pruebas con carga parcial del conjunto del conjunto de exoesqueleto

	<p>Los motores de paso con caja de engranajes que están en la cadera simulan la marcha, pero no cumple con los límites máximos diseñados, este depende a las características del motor mas no de la parte mecánica, cuando esta ensamblada toda la pierna el peso es muy significativo, pero en si la pierna llega a un máximo de 21 grados hacia adelante y los -15 grados hacia atrás.</p>
	<p>Los motores de la rodilla levantan los eslabones de la pantorrilla con normalidad, pero no pueden levantar el peso que genera la pantorrilla y el pie y el motor del tobillo puede levantar el pie con normalidad. Cumple el movimiento de rodilla de 0 a 39 grados. Y el movimiento de tobillo de +18 a -18 grados.</p>

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

5.4.3.4 Pruebas mecánicas del conjunto de exoesqueleto

Las pruebas mecánicas consisten en la verificación de ruidos o vibración cuando está en acción, una vez realizada las pruebas en vacío y con carga parcial, se observó el funcionamiento y desempeño de los elementos del prototipo.

Tabla 27-5: Pruebas mecánicas del conjunto de exoesqueleto

Elementos	Ruidos	Vibración	Ningún problema	Observaciones
Estructura de la grúa			X	
Cabrestante.	X	X		El cabrestante cuando entra en operación y levanta al paciente presenta ruidos y vibración ya que es normal cuando se usa este mecanismo accionado por un motor
Motores de pasos		X		El motor presenta un poco de vibración cuando simula la marcha siendo una característica normal de estos motores.
Soporte motores de paso.			X	
Pernos			X	

Realizado por: Joel Lliguay 2018
Fuente: Autor

CAPÍTULO VI

6. COSTOS

Es necesario realizar este análisis de costos para tener en cuenta la inversión del proyecto y para ello se divide en costos directos e indirectos.

6.1 Costos directos

Estos costos son la inversión fija que se requiere en la elaboración del proyecto como son materiales, mano de obra, equipos, herramientas y transporte.

6.1.1 Costo de los materiales

Tabla 1-6: Costos de los materiales

N.º	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	UNIDADES	COSTO UNIT.	COSTO TOTAL
1	1	Tubo rectangular estructural 100x50x2.	m	29,40	29,40
2	0,50	Tubo cuadrado estructural 2x3 (50x3).	m	28,55	14,28
3	8	Suelda AGA 6011*1/8	lb.	1,55	12,40
4	1	Tubo cuadrado estructural 11/4x2 (30x2).	m	12,10	12,10
5	2	Bisagra torneada 1in*3	u	2,10	4,20
6	0,5	Tubo redondo estructural 34x2mm.	m	8,20	4,10
7	2	Pernos 7/8x2 con tuerca.	u	8,57	8,57
8	2550	Grilon plancha de 15mm.	mm ²	0,03	76,50
9	2550	Grilon plancha de 25mm.	mm ²	0,04	102,2
10	14	Arandela plana gal. 3/16	u	0,0179	0,25
11	16	Perno allen. MM G8 5X20	u	0,1339	2,14
12	14	Perno allen. MM G8 5X40	u	0,1786	2,50
13	10	Tuerca gal. M 4X0.70	u	0,0176	0,18
14	4	Tuerca gal. M 5X0.80	u	0,0176	0,07
15	10	Tornillo MM 4x25	u	0,0893	0,89
16	4	Tornillo MM 5x25	u	0,1340	0,54
17	8	Tornillo avellanado MM 3x25	u	0,1347	1,08
18	4	Tinher acrílico disther	litro	2,23	8,92

19	4	Fondo acrílico gris litro	litro	3,57	14,28
20	1	Blanco sintético unidas	galón	17,85	17,85
21	1	Tecle 250 kilos century	u	125	125
22	2	Nema 23 Stepper Motor Bipolar L=56mm w/ Gear Ratio 47:1 Planetary Gearbox	u	60,25	120,50
23	2	Nema 17 Bipolar 1.8deg 44Ncm (62.3oz.in) 0.85A 5.3V 42x42x48mm 4 Wires	u	14,71	29,42
24	2	Nema 23 Bipolar 1.26Nm (178.4oz.in) 2.8A 2.5V 57x56mm 4 Wires Ø6mm Shaft	u	20,6	41,20
25	4	Tapón cuadrado 50mm	mm ²	0,15	0,60
26	1	Tapón cuadrado 30mm	mm ²	0,10	0,10
27	2	Tapón redondo 32mm	mm ²	0,18	0,36
28	12	Rodamientos 600	u	0,71	8,52
29	0,5	Varilla redonda estructural 19mm	m	2,15	2,15
30	24	Anillos de sujeción	u	0,20	4,80
31	1	Disco corte	u	2	2
32	1	Disco pulir	u	2	2
33	1	Conjunto de arnés seguridad industrial	u	30	30
34	4	Eslabones de arnés	u	1,50	6
				Subtotal	530,072 USD

Realizado por: Joel Lliguay 2018
Fuente: Autor

6.1.2 Costo de la mano de obra

Se determina el costo de mano de obra en base al salario mínimo del sector metalmecánico y del mecanizado.

Tabla 2-6: Costos de mano de obra

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	SALARIO REAL/HORA	HORAS- HOMBRE	COSTO TOTAL
Técnico CAD/CAM	1	5	45	225
Soldador especializado	1	3,50	44	154
Ayudantes en general	2	2,50	80	400
			Subtotal	779 USD

Realizado por: Joel Lliguay 2018
Fuente: Autor

6.1.3 Costos de equipos y herramientas

Tabla 3-6: Costos de equipos y herramientas

DESCRIPCIÓN	COSTO/HORA	HORAS DE EQUIPO	COSTO TOTAL
Soldadora de arco	1,54	10	15,4
Centro de mecanizado vert. cnc	25	30	750
Torno	12,00	3	36
Dobladora de tubos manual.	1,75	2	3,5
Taladro de pedestal	1,75	3	3,5
Flexómetro	0,8	4	3,2
Calibrador pie de rey	0,9	5	4,5
Escuadra	0,85	2	1,7
Taladro manual	1,31	2	2,62
Pulidora	1,2	2	2,4
Amoladora	1,22	2	2,44
Esmeril	1,08	2	2,16
Compresor	1,30	3	3,9
Herramientas menores	1,08	29	31,32
		Subtotal	862,64 USD

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

6.1.4 Costo del transporte de materiales

El costo de transporte de los materiales vía local y regional se estimó un valor de 30 dólares a sus respectivos lugares de construcción.

6.1.5 Costo total directo

Es la suma de todos los costos de los materiales, mano de obra, transporte y de los equipos.

Tabla 4-6: Costo total directo

Costo de materiales	530,072 USD
Costo de mano de obra	779 USD
Costo de equipos y herramientas	862,64USD
Transporte	30 USD
Total, costos directos	2201,712 USD

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

6.2 Costos indirectos

Los costos indirectos son aquellos que se considera algunos valores referenciales en relación con los costos directos, tiene un valor agregado del (20%-25%) y se muestran a continuación.

Tabla 5-6: Costo total directo

DENOMINACIÓN	PORCENTAJE (%)	VALOR (USD)
Imprevistos costos directos	6	132,10
Armado del prototipo	1	22,01
Utilidad	10	220,17
Otros	3	66,05
Total, costos indirectos	20%	440,33

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

6.3 Costo total

El costo total es la suma de los costos directos y los costos indirectos, analizados anteriormente.

Tabla 6-6: Costo total

Costos directos.	2201,712 USD
Costos indirectos.	440,33 USD
TOTAL.	2642,042 USD

Realizado por: Joel Lliguay 2018

Fuente: Autor

EL costo total para el proyecto esta evaluada en 2642,042 USD

CAPÍTULO VII

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

Se construyo el prototipo de exoesqueleto, se logró desarrollar y cumplir con todos los objetivos propuestos.

Se estudio el estado del arte correspondiente a los últimos desarrollos tecnológicos en el área de exoesqueletos dedicados en rehabilitación ayudando con su contribución para la construcción de este proyecto siendo la mayor inspiración el LOKOMAT.

Se modelo un prototipo virtual de exoesqueleto mediante un software CAD ayudando analizar con simulaciones y pruebas antes de su respetiva construcción, ahorrando dinero y tiempo.

Se estudio y se seleccionó los procesos de manufactura adecuados para la construcción mediante el mismo garantizar buenos resultados de funcionalidad en el exoesqueleto.

Se selecciono los materiales adecuados para cada elemento del exoesqueleto dando prioridad a las necesidades de funcionalidad y su respectivo proceso seleccionado para su mecanización.

Se concluye realizado las pruebas y los cálculos mecánicos de simulación de la marcha para un exoesqueleto en vacío, debido a que no se toma en cuenta el peso de las extremidades del paciente ni su tipo de discapacidad.

La parte mecánica cumple con todos los ángulos requeridos y aquí corroboramos que al final no se llegó al punto de la prueba ya que los motores se seleccionaron por estar en el limites es decir que los motores no tienen el torque requerido para vencer todos los requerimientos necesarios, pero simula la marcha con los siguientes resultados, cadera: +21 a -15 grados, rodilla: 0 a 39 grados, tobillo: +18 a -18 grados.

Esto quiere decir que se requiere un cambio de motores y por para ello el diseño entonces una parte se seguirá trabajando mientras se realizan las mejoras antes de tener el prototipo final.

El proyecto en su totalidad sirve de apoyo para futuras investigaciones y desarrollos en este tipo de proyectos para el grupo de investigación.

7.2 Recomendaciones

A pesar de que el dispositivo cumple de forma adecuada con la mayoría de las especificaciones requeridas, este es la primera aproximación del modelo y por lo tanto es susceptible a mejoras y cambios que beneficien en el funcionamiento del sistema.

Desarrollar una nueva caja reductora que genere más torque estudiando una nueva transmisión de movimiento.

Construir un prototipo final y realizar las pruebas con pacientes.

Construir o diseñar un tipo de exoesqueleto con actuadores lineales.

Estudiar un exoesqueleto sin la utilización directa de actuadores.

Reducir el número de 6 mores a 1 mediante un sistema de mecanismo de engranes.

Estudiar varios tipos de control P&D, control difuso para aplicar en el exoesqueleto.

BIBLIOGRAFÍA

Aguirre, Emiliano y Cevallos, Daniel. Repositorio Institucional de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. [En línea] 03 de Mayo de 2017. [Citado el: 20 de enero de 2018.] <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/6721>. 2017, pp. 22-121.

Ashby, Michael F. *Materials Selection in Mechanical Design*. s.l.: BUTTERWORTH-HEINEMANN, 2005. ISBN 0 7506 6168 2.

Ashby, Mike. Granta Design. [En línea] 2011. [Citado el: 2 de Marzo de 2018.] <http://materias.fi.uba.ar/7213/CLASE3CESEDUPACKMATERIALES%20II.pdf>.

Bavaresco, Guillermo. Gabp Ingeniería. [En línea] 2017. [Citado el: 21 de Noviembre de 2017.] <https://gabpingenieria.weebly.com/uploads/2/0/1/6/20162823/pffresadora.pdf>.

2016. Aceros Levinson. [En línea] 2016. [Citado el: 25 de Octubre de 2017.] <http://www.aceroslevinson.com/2016/11/que-es-el-maquinado/>.

CONALEP. 2018. [En línea] 2018. [Citado el: 21 de Noviembre de 2017.] <https://sites.google.com/site/dolff9m/4>.

Consorcio Opensurg. 2013. *Robótica médica-Notas prácticas para el aprendizaje de la robótica en bioingeniería*. Elche : CYTED, 2013. pág. 301. I.S.B.N.: 978-84-15413-12-7.

Emmer, Gene. [En línea] 2013. [Citado el: 8 de Junio de 2017.] <http://www.exoesqueleto.com.es/iquestcoacutemo-funciona-un-exoesqueleto.html>.

Full Mecánica. 2016. Full Mecánica. [En línea] 2016. [Citado el: 25 de octubre de 2017.] <http://www.fullmecanica.com/definiciones/d/350-duraluminio>.

Fundación Prointec. *Diseño para fabricación y ensamblaje*. ISBN: 978-84-613-6850-1.

Grosso, Juan y Tibaduiza Burgos, Diego Alexander. Diseño conceptual de un exoesqueleto para asistir la rehabilitación de miembro inferior. [En línea] Octubre de 2009. https://www.researchgate.net/publication/258265871_Diseño_conceptual_de_un_exoesqueleto_para_asistir_la_rehabilitacion_de_miembro_inferior.

2016. Industrias JQ. *Plasticos de ingeniería*. [En línea] 2016. [Citado el: 5 de marzo de 2018.] <http://www.jq.com.ar/Imagenes/Productos/Poliamida6/Poliam6/dtecnicos.htm>.

2018. Interempresas.net. [En línea] 2018. [Citado el: 17 de Febrero de 2018.] <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/FeriaVirtual/Producto-Centro-de-mecanizado-vertical-Romi-D-600-69348.html>.

Kalpajian, Serope y Schmid, Steven. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Mexico : PEARSON EDUCACIÓN, 2008. Vol. V. ISBN: 978-970-26-1026-7.

Hector Álvaro, Gonzalez y Gonzalez, Dario. *La importancia del metodo en la selección de materiales*. 24, Risaralda : s.n., 2004. ISSN 0122-1701.

López, R, y otros. 2014. scielo.org. [En línea] Revista mexicana de ingeniería biomédica, 2014. [Citado el: 25 de octubre de 2017.] http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-95322014000100004. ISSN 0188-9532.

Riba Romeva, Carles. 2002. *Diseño concurrente*. s.l. : EDICIONES UPC, 2002. págs. 59-60.

Rossa, Alberto y González, Francisco. Laboratorio de Innovación Tecnológica para el Diseño. *slideshare*. [En línea] [Citado el: 5 de Marzo de 2018.] https://es.slideshare.net/betorossa/diseo-y-seleccion-de-materiales-tecnologa-de-materiales?from_action=save.

Ruiz Olaya, Andrés Felipe. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. [En línea] 2009. [Citado el: 25 de octubre de 2017.] <http://hdl.handle.net/10016/5636>.

2017. S&B IMPORT. [En línea] 2017. [Citado el: 20 de noviembre de 2017.] https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-414868404-wincha-tecle-electrico-hoist-250kg-500lb-_JM#redirectedFromParent.

2018. slideshare. [En línea] 2018. [Citado el: 5 de marzo de 2018.] https://es.slideshare.net/aicvigo1973/tolerancias-geometricas?from_action=save.

Miao, Yunjie, Feng Gao, Dalei Pan. *State classification and motion description*. s.l. : Journal of Bionic Engineering, 2014, Vol. 11.

2017. Sumiteccr. [En línea] 2017. [Citado el: 20 de Enero de 2018.] <http://www.sumiteccr.com/acero/estructural/AE03.pdf>.

Suñer, Departamento Electrónica - CIPFP Luis. 2013. roboticasunyer. [En línea] 2013. [Citado el: 25 de Octubre de 2017.] <http://roboticasunyer.blogspot.com/>.

2017. www.inoxidable.com. [En línea] 2017. [Citado el: 20 de Enero de 2018.] <http://www.inoxidable.com/propiedades1.htm>.

Universidad del País Vasco. Universidad del País Vasco. [En línea] 2017. [Citado el: 21 de noviembre de 2017.] http://www.ehu.eus/manufacturing/docencia/723_ca.pdf.